

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ANÁLISE E PROPOSIÇÃO DE MEDIDAS SUSTENTÁVEIS
EM DRENAGEM URBANA NA REGIÃO DO LAGO NORTE-
DF POR MEIO DE MODELAGEM HIDROLÓGICA-
HIDRÁULICA**

ANNE SANTOS ARAÚJO

ORIENTADOR: SERGIO KOIDE, PhD
CO-ORIENTADORA: MARIA ELISA LEITE COSTA, MSc

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL II EM ENGENHARIA
AMBIENTAL**

BRASÍLIA/DF, DEZEMBRO DE 2018

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

**ANÁLISE E PROPOSIÇÃO DE MEDIDAS SUSTENTÁVEIS
EM DRENAGEM URBANA NA REGIÃO DO LAGO NORTE-
DF POR MEIO DE MODELAGEM HIDROLÓGICA-
HIDRÁULICA**

ANNE SANTOS ARAÚJO

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 2 SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA
AMBIENTAL.**

APROVADA POR:

**SERGIO KOIDE, PhD (UnB)
(ORIENTADOR)**

**JEFERSON DA COSTA, MSc
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**ARTHUR TAVARES SCHLEICHER, MSc
(EXAMINADOR INTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 07 de dezembro de 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

ARAÚJO, Anne Santos

Análise e proposição de medidas sustentáveis em drenagem urbana na região do Lago Norte - DF por meio de modelagem hidráulica-hidrológica.

xii, 80 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2018)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Drenagem Sustentável

2. SWMM

3. Modelagem hidrológica-hidráulica

4. Drenagem urbana

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ARAÚJO, A. S. (2018). Análise e proposição de medidas sustentáveis em drenagem urbana na região do Lago Norte - DF por meio de modelagem hidrológica-hidráulica. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 80 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Anne Santos Araújo

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 2: Análise e proposição de medidas sustentáveis em drenagem urbana na região do Lago Norte - DF por meio de modelagem hidrológica-hidráulica. GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2018

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Anne Santos Araújo

SCLN 405, Bloco B, Apartamento 215 – Asa Norte
70.846-520 – Brasília/DF – Brasil

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Anderson e Susyane, por todas as oportunidades e investimentos desde a infância até a faculdade, por acreditarem em mim e me permitirem sonhar; às minhas irmãs, Andressa e Adryane, sem as quais eu não seria eu; e a Deus, por me cercar de pessoas tão maravilhosas ao longo de toda minha vida.

À UnB, por ser casa e por todas as portas que abriu para mim.

Aos professores da Engenharia Ambiental, primeiro por terem fundado esse curso e segundo por todo esforço e entrega que colocam no trabalho. Obrigada por nos formarem nessa profissão tão grandiosa.

Às amigas da graduação para a vida toda, Becca, Gabi, Caló, Carol e Lô, que tornaram Brasília uma nova casa para mim, obrigada por todas as risadas e pelo carinho.

À Concreta, obrigada pela oportunidade e privilégio de poder trabalhar durante três anos em um ambiente tão incrível, por me ajudar a me encontrar, por me apresentar alguns dos meus melhores amigos e representar um marco na minha vida profissional e pessoal. E a todas as pessoas que conheci nessa empresa; vocês são pessoas extraordinárias, que me inspiraram e me ensinaram a ser melhor em tudo o que faço.

Ao Professor Koide por ter me acolhido e orientado nesse projeto, sempre me dando segurança para realização de um bom trabalho. E Elisa, minha co-orientadora, sem a qual esse projeto não teria ido pra frente: obrigada por me mostrar o caminho todas as vezes que eu não sabia o que fazer e por ser tão incrível com todas pessoas à sua volta.

À CHI Water, por disponibilizar gratuitamente o software PCSWMM para realização do projeto acadêmico.

RESUMO

O manejo das águas pluviais urbanas consiste em um dos grandes problemas de saneamento enfrentado pelo Brasil atualmente, inclusive no Distrito Federal. A maioria dos sistemas de drenagem implementados atualmente foi concebido sob uma lógica tradicional, prezando pelo afastamento das águas pluviais das áreas urbanas o mais rápido possível. No entanto, observa-se que a tendência mundial é a aplicação de novos conceitos e tecnologias, visando fazer o manejo sustentável das águas pluviais e amenizando o impacto da urbanização sobre o escoamento superficial, através da aplicação das medidas de baixo impacto (LIDs). No presente trabalho foi feita a análise do sistema de drenagem pluvial urbano implementado na região do Lago Norte-DF, concebido sob a ótica de sistemas tradicionais, por meio da análise de cinco sub-bacias de áreas relativamente pequenas, entre 20 e 47 hectares. Foram averiguadas falhas do sistema de drenagem por meio da análise do extravasamento de poços de visita e análise da vazão total escoada pelo exutório. Com base nesse cenário, foram feitas propostas de implementação de LIDs na região com vias a adequar a rede à legislação atual e aprimorar o seu funcionamento. Essas análises foram feitas em quatro cenários, com eventos de tempo de retorno igual a 1, 2, 5 e 10 anos. Verificou-se que a utilização de LIDs contribuiu para redução do volume total extravasado na região, principalmente nos eventos com tempo de retorno entre 1 e 5 anos, chegando a eliminar totalmente os eventos de extravasamento para chuva de 1 ano na sub-bacia com mais sobrecarga da rede. Para as sub-bacias com menos extravasamento, as LIDs foram capazes de eliminar esse fenômeno nas chuvas com tempo de retorno igual a 10 anos. Porém a aplicação das medidas não foi suficiente para limitar o escoamento máximo à vazão específica determinada por lei para os eventos com tempo de retorno igual a 10 anos. As LIDs chegaram a reduzir em até 63% a vazão específica. Seria necessário reduzir em até 85% para alcançar o limite determinado por lei, comprovando a importância de se utilizar outras medidas estruturais e não estruturais para manutenção dessa vazão dentro dos limites.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS.....	3
	2.1 OBJETIVO GERAL.....	3
	2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
	3.1 URBANIZAÇÃO E O ESCOAMENTO SUPERFICIAL	4
	3.2 SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA	6
	3.3 MEDIDAS SUSTENTÁVEIS EM DRENAGEM URBANA	7
	3.3.1 SuDS – Reino Unido.....	8
	3.3.2 LIDs.....	11
	3.3.3 Bacias de retenção, retenção e/ou infiltração	12
	3.3.4 Trincheiras de infiltração e/ou retenção	15
	3.3.5 Pavimentos permeáveis.....	16
	3.4 BASES LEGAIS.....	17
	3.4.1 Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal.....	19
	3.4.2 Resolução Nº. 09/2011 – Adasa.....	20
	3.5 MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	21
	3.6 SWMM	22
4	METODOLOGIA.....	26
	4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	27
	4.1.1 Clima.....	28
	4.1.2 Solo, Vegetação e Relevo	29
	4.1.3 Hidrografia	30
	4.1.4 RA Lago Norte.....	31
	4.1.5 Drenagem na RA Lago Norte	32
	4.1.6 Sub-bacias de análise	32

4.2 ESTRUTURAÇÃO DO BANCO DE DADOS.....	34
4.2.1 Topografia	34
4.2.2 Uso e ocupação do solo.....	35
4.2.3 Determinação do CN.....	37
4.2.4 Rede de drenagem	38
4.2.5 Chuva de Projeto	39
4.3 SIMULAÇÕES HIDROLÓGICAS-HIDRÁULICAS	40
4.3.1 Comparação da modelagem	40
4.3.2 Cenários de simulação.....	41
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.1 COMPARAÇÃO DA MODELAGEM	46
5.2 ANÁLISE DA SUB-BACIA RESIDENCIAL.....	47
5.3 ANÁLISE DAS SUB-BACIAS DO CA	56
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Efeito da urbanização sobre o hidrograma de escoamento superficial (Tucci, 2007)	5
Figura 3.2 – Exemplos de aplicação de biorretenção: a. Células de biorretenção; b. Jardins de chuva (Rossman, 2015).	11
Figura 3.3 – Exemplos de aplicação de telhados verdes (Woods Ballard, B., <i>et al</i> , 2015).....	12
Figura 3.4 – Exemplo de aplicação de pavimento permeável em estacionamento utilizando blocos de concreto vazado (Costa, 2007).	12
Figura 3.5 – Localização das bacias monitoradas (Campana <i>et al.</i> , 2007)	14
Figura 3.6 - Trincheira de infiltração associada ao sistema viário (Moreira <i>et al.</i> , 2017)	16
Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia a utilizada.....	27
Figura 4.2 – Mapa do Distrito Federal com a localização da região de estudo dentro da Região Administrativa do Lago Norte.....	28
Figura 4.3 – Mapa de solos do Distrito Federal, na escala 1:100.000, com indicação das classes de solos (Reatto <i>et al.</i> , 2004)	30
Figura 4.4 – Área de estudo com identificação do ponto de captação emergencial da CAESB e principais cursos d’água	31
Figura 4.5 – Mapa de localização das sub-bacias de análise do projeto.	33
Figura 4.6 – Mapa de delimitação das sub-bacias do projeto.....	34
Figura 4.7 - Modelo digital de elevação da área de estudo do projeto.	35
Figura 4.8 – Mapa de uso do solo das sub-bacias analisadas.	37
Figura 4.9 – Mapas da rede de drenagem das sub-bacias de análise.....	39
Figura 4.10 – Esquema ilustrativo das camadas das trincheiras de infiltração (Chi Water, 2018).....	43

Figura 4.11 – Esquema ilustrativo das camadas dos pavimentos permeáveis (Chi Water, 2018).	44
Figura 4.12 – Esquema ilustrativo das valas de infiltração (Chi Water, 2018).....	45
Figura 5.1 – Hidrograma de escoamento resultante da chuva com intensidade de 107,11 mm/h, tempo de retorno de 10 anos e duração de 25 minutos dado pela simulação no PCSWMM.	47
Figura 5.2 – Mapa da sub-bacia Residencial com destaque para os poços de visita, indicando aqueles nos quais houve mais extravasamento para TR = 1 ano.....	48
Figura 5.3 – Mapa da sub-bacia Residencial com destaque para os poços de visita, indicando aqueles nos quais houve mais extravasamento para TR = 10 anos.	49
Figura 5.4 – Mapa com alocação dos LIDs nos cenários 1 e 2.	50
Figura 5.5 – Hidrograma da chuva de projeto de TR=1 e vazão no exutório da sub-bacia Residencial no cenário base, cenário 1 e cenário 2.	51
Figura 5.6 – Vazão no exutório da sub-bacia Residencial para a chuva de projeto de TR = 5 anos nos cenários base, 1, 1.1, e 2.	52
Figura 5.7 – Mapa com alocação das valas de infiltração.	54
Figura 5.8 – Gráfico da vazão de água extravasada no momento de pico da chuva com tempo de retorno de 5 anos.....	55
Figura 5.9 – Mapa das sub-bacias do CA com destaque para pontos com extravasamento na chuva de tempo de retorno de 10 anos no cenário base.....	56
Figura 5.10 – Mapa com alocação das LIDs nas sub-bacias do CA.	57
Figura 5.11 – Gráfico da vazão de extravasamento para os três cenários em uma chuva com tempo de retorno igual a 10 anos.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Tipos de componentes de SuDS e os critérios atendidos nos diferentes projetos (Adaptado de Woods Ballard <i>et al.</i> , 2015).	10
Tabela 3.2 - Coeficientes de escoamento superficial para diferentes tipos de pavimentos (Adaptado de Araújo <i>et al.</i> , 2000)	17
Tabela 4.1 – Relação das áreas de cada sub-bacia analisada.....	34
Tabela 4.2 – Caracterização percentual de uso e ocupação do solo de cada sub-bacia.....	36
Tabela 4.3 – CN adotado para cada uso de solo existente nas sub-bacias, de acordo com Tucci (1995).	37
Tabela 4.4 – CN médio de cada sub-bacia.	38
Tabela 4.5 – Parâmetros de caracterização da rede de drenagem nas sub-bacias de análise. ...	38
Tabela 4.6 – Lâmina precipitada em cada chuva simulada.	40
Tabela 4.7 – Valores de referência de coeficiente de escoamento superficial (C) para os usos do solo da bacia analisada.	41
Tabela 4.8 – Descrição dos cenários de simulação.	42
Tabela 4.9 – Camadas utilizadas para modelar LIDs no PCSWMM (Adaptado de CHI Water, 2018).....	43
Tabela 4.10 – Parâmetros e dimensões utilizados para modelagem das trincheiras de infiltração.....	43
Tabela 4.11 – Parâmetros e dimensões utilizados para modelagem dos pavimentos permeáveis.	44
Tabela 4.12 – Parâmetros e dimensões utilizados para modelagem das valas de infiltração....	45
Tabela 5.1 – Coeficientes de escoamento dos usos de solo das sub-bacias do projeto.....	46
Tabela 5.2 – Vazão de pico da sub-bacia Residencial calculada pelo método racional.....	46

Tabela 5.3 – Análise da área ocupada por LIDs na sub-bacia Residencial nos cenários 1, 1.1 e 2.	53
Tabela 5.4 – Resultados da simulação para as chuvas de tempos de retorno igual a 1, 2, 5 e 10 anos, para os parâmetros: vazão de pico no exutório; volume total escoado no exutório; volume de água extravasada nos poços de visita com extravasamento.....	53
Tabela 5.5 – Vazão específica simulada para cada cenário na sub-bacia Residencial.	55
Tabela 5.6 – Vazão específica calculada para os exutórios das sub-bacias do CA.....	57
Tabela 5.7 – Percentual de área superficial ocupada por cada tipo de LID.	58
Tabela 5.8 - Vazão específica nos exutórios das sub-bacias do CA para cada cenário simulado.	58
Tabela 5.9 – Análise da redução do volume extravasado na área das sub-bacias do CA com utilização das LIDs.	59
Tabela 5.10 – Resultados da simulação no exutório da sub-bacia CA 1 para as chuvas de tempos de retorno igual a 1, 2, 5 e 10 anos, para os parâmetros: vazão de pico no exutório; volume total escoado no exutório.....	60
Tabela 5.11 – Resultados da simulação no exutório da sub-bacia CA 2 para as chuvas de tempos de retorno igual a 1, 2, 5 e 10 anos, para os parâmetros: vazão de pico no exutório; volume total escoado no exutório.....	60
Tabela 5.12 – Resultados da simulação no exutório da sub-bacia CA 3 para as chuvas de tempos de retorno igual a 1, 2, 5 e 10 anos, para os parâmetros: vazão de pico no exutório; volume total escoado no exutório.....	61
Tabela 5.13 – Resultados da simulação no exutório da sub-bacia CA 4 para as chuvas de tempos de retorno igual a 1, 2, 5 e 10 anos, para os parâmetros: vazão de pico no exutório; volume total escoado no exutório.....	61

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 4.1
21	
Equação 4.2
22	
Equação 4.3
38	
Equação 4.4
39	
Equação 4.5
39	

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

Adasa	Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal
BH	Bacia Hidrográfica
CAESB	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
CHI	<i>Computational Hydraulics International</i>
CN	Curva Número
C	Coeficiente de escoamento superficial
Codeplan	Companhia de Planejamento do Distrito Federal
DF	Distrito Federal
DQO	Demanda química de oxigênio
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPDB	Estrada Parque Dom Bosco
EPCV	Estrada Parque Cabeça do Veado
EPIA	Estrada Parque Indústria e Abastecimento
I	Intensidade da chuva
IDF	Intensidade Duração Frequência
LID	<i>Low Impact Development</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
Novacap	Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil
P	Precipitação total
PDAD	Pesquisa Distrital por Amostra de Domicílios
PDDU	Plano Diretor de Drenagem Urbana
Q	Vazão de escoamento
Qi	Quadra interna
Ql	Quadra do Lago
RA	Região Administrativa
S	Capacidade de armazenamento
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SEGETH	Secretaria de Estado de Gestão do Território e Habitação
SHIN	Setor de Habitação Individual Norte
SMDB	Setor de Mansões Dom Bosco
SML	Setor de Mansões do Lago
SuDS	<i>Sustainable Drainage Systems</i>
SWMM	<i>Storm Water Management Model</i>
TR	Tempo de retorno
t	Tempo de duração da chuva
Terracap	Agência de Desenvolvimento do Distrito Federal
UH	Unidade Hidrográfica
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>

1 INTRODUÇÃO

O fenômeno da urbanização acarreta em uma série de impactos que afetam tanto a qualidade do meio ambiente quanto a qualidade de vida da população. A ocorrência de inundações e alagamentos no meio urbano é um exemplo desses impactos negativos, que coloca em risco a vida das pessoas, atrapalha o trânsito e deteriora o meio urbano de maneira geral. Isso ocorre devido a uma das principais modificações que a urbanização impõe ao meio ambiente natural: a impermeabilização e transformação da superfície do solo, alterando drasticamente o ciclo natural da água.

Faz-se necessária a construção de sistemas de drenagem urbana, integrados ao planejamento urbanístico, de forma a mitigar e controlar os efeitos negativos que as chuvas podem ter sobre as cidades e sobre o meio ambiente. Esses efeitos vão desde a geração de grande volume de escoamento superficial, até problemas de erosão e carreamento de resíduos sólidos e de sedimentos para os corpos receptores. Percebe-se que as soluções para esses problemas não podem ser vistas de forma isolada, mas devem observar a rede de drenagem de maneira integral (Adasa, 2018).

A cidade de Brasília possui muitos problemas relacionados à drenagem urbana, verifica-se que a maioria dos sistemas de drenagem se encontram sobrecarregados, seja por subdimensionamento da rede, seja por causa da urbanização descontrolada, com alterações indevidas no uso e ocupação do solo. Além disso, a concepção dos sistemas do Distrito Federal foi feita sob uma abordagem tradicional, buscando afastar o escoamento superficial da área urbana e despejar nos corpos hídricos o mais rápido possível (GDF, 2009). Nesse panorama, o escoamento superficial gerado nas cidades transporta os mais variados poluentes à medida em que percorre os telhados, coberturas, vias e calçamentos. Além do mais, muitas vezes os sistemas de esgotamento sanitário e de limpeza urbana são ineficientes, implicando em mais cargas de poluentes no sistema de drenagem. Dessa maneira, a questão da qualidade se torna um dos grandes problemas hoje nos sistemas de manejo e drenagem de águas pluviais.

A região administrativa do Lago Norte, apesar de ser uma das regiões com a população de classe social mais elevada no DF (Codeplan, 2016), também enfrenta problemas de alagamentos. Apesar de estar muito próxima ao Lago Paranoá, corpo receptor capaz de amortecer o volume de escoamento superficial ali gerado, a rede é sobrecarregada em muitos pontos e não se tem um controle da qualidade desse efluente que está sendo

lançado, daí a necessidade de se fazer análises quantitativas e qualitativas das águas escoadas na rede de drenagem atualmente instalada.

Somado a tudo isso, observa-se hoje que a forma de gestão dos sistemas de drenagem urbana e as infraestruturas instaladas no Brasil ainda são muito atrasadas frente às novas tendências observadas ao redor do mundo (Canholi, 2014). Os sistemas de drenagem urbana devem ser pensados numa lógica integral, observando a bacia hidrográfica e com implementação de medidas sustentáveis de modo a aproveitar os benefícios que a precipitação pode trazer (Woods Ballard, B., *et al.*, 2015). Esses sistemas também devem considerar toda a dinâmica do saneamento, uma vez que sofrem influência direta ou influenciam os sistemas de tratamento de água, tratamento de esgoto e de coleta e disposição de resíduos sólidos.

A simulação computacional dos fenômenos hidrológicos-hidráulicos tem sido uma ferramenta amplamente utilizada no estudo e na elaboração dos projetos de drenagem de águas pluviais urbanas. O SWMM é um modelo hidrológico-hidráulico utilizado principalmente para simulações em áreas urbanas. Por meio desse, é possível analisar o funcionamento de um sistema e simular a utilização de medidas compensatórias inseridas ao longo da área de drenagem. O PCSWMM é um programa, distribuído pela CHI Water, que utiliza o modelo SWMM, por meio de uma interface de fácil utilização e com recursos aprimorados.

Utilizando o programa PCSWMM, o presente trabalho faz uma análise da infraestrutura de drenagem de águas pluviais instalada em cinco sub-bacias delimitadas dentro da região administrativa do Lago Norte - DF. A partir de uma análise da situação atual e desempenho da rede implementada, observando as diretrizes dos instrumentos legais pertinentes e as pesquisas e novas tecnologias da literatura atual, foram propostas medidas compensatórias de modo a mitigar os efeitos da urbanização sobre o meio ambiente natural e urbano.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste projeto é avaliar o sistema de drenagem urbana da Região Administrativa do Lago Norte, Brasília/DF, por meio de simulação hidrológica-hidráulica a fim de propor medidas sustentáveis ao manejo das águas pluviais.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar os problemas de drenagem urbana na região de estudo;
- Propor medidas sustentáveis para auxiliar o sistema de drenagem existente a fim de reestabelecer a infiltração e diminuir o volume de extravasamentos ao longo da rede;
- Comparar a eficiência de retenção do volume do escoamento entre medidas compensatórias.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 URBANIZAÇÃO E O ESCOAMENTO SUPERFICIAL

O escoamento superficial consiste em um importante fenômeno do ciclo hidrológico influenciado diretamente pela infiltração de água no solo e por alguns outros fenômenos e condições da superfície terrestre. A urbanização impõe uma série de mudanças na configuração natural do terreno, como diminuição da infiltração, redução da cobertura vegetal e aplanamento do terreno, que trazem grande impacto para o desenvolvimento do escoamento superficial. Esses impactos são, sobretudo, negativos, destacando-se a ocorrência de extravasamentos e alagamentos em eventos de cheia, trazendo problemas ambientais e riscos à vida da população urbana. Nesse tópico serão abordados os aspectos do escoamento superficial e os impactos da urbanização nesse fenômeno.

A água que precipita sobre a superfície terrestre pode seguir diversos caminhos, que são influenciados pelas condições do meio. Quando a superfície é coberta por vegetação, uma parcela é interceptada nos caules e folhas, de onde evapora de volta para a atmosfera ou acaba por escoar para o solo. O que não é interceptado no caminho, cai diretamente no solo e, a princípio, infiltra até que a superfície do solo seja saturada. A partir do momento em que essa superfície não consegue mais absorver água, forma-se um excedente que irá escoar superficialmente. Esse escoamento consiste em um carreamento da água impelido pela força da gravidade e moldado pela topografia, formando uma rede de microdrenagem que converge para os cursos d'água de escoamento direto, os rios (Tucci, 2001).

O escoamento superficial em uma bacia hidrográfica pode ser representado pelo hidrograma, gráfico que relaciona vazão escoada e tempo. Tipicamente, ao ocorrer um evento de chuva, observa-se que a vazão na bacia começa a aumentar lentamente, sendo inicialmente retardada pela ocorrência de interceptação vegetal, pelo armazenamento de água em depressões do solo e pelo próprio tempo de deslocamento da água. A partir de certo momento, essa vazão aumenta rapidamente até atingir uma vazão de pico. Então, influenciada pelos fenômenos de infiltração e percolação no solo, a vazão de escoamento superficial começa a decrescer, dando protagonismo à formação do escoamento subterrâneo (Tucci, 2001).

Com a urbanização, essa superfície terrestre é retirada da condição natural. Essencialmente, a vegetação e o terreno irregular, que antes eram responsáveis por interceptar um volume de água e por retardar o escoamento superficial, dão lugar a

superfícies lisas, causando o aumento da velocidade do escoamento. Além disso, o solo que antes tinha uma alta taxa de permeabilidade, possibilitando a infiltração e armazenamento de um volume de água, dá lugar a um terreno impermeável, resultando no aumento do volume de água que irá escoar. O resultado disso tudo é um aumento da vazão de cheia e do volume superficial do hidrograma da bacia (Tucci, 2016). Esse efeito pode ser ilustrado na Figura 3.1, que compara um hidrograma com e sem a urbanização.

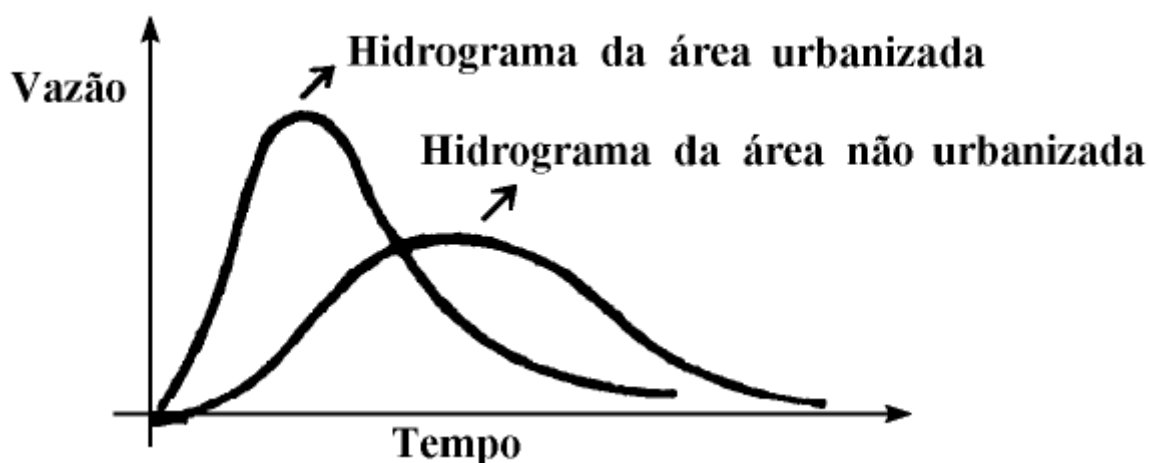


Figura 3.1 - Efeito da urbanização sobre o hidrograma de escoamento superficial (Tucci, 2007)

A diminuição da infiltração também prejudica o abastecimento dos aquíferos subsuperficiais. A condução de água pelos aquíferos, por sua vez, contribui de forma significativa para a vazão dos cursos d'água superficiais, de formas diferentes no período de seca e no período de cheia. Na cheia, os rios recebem grande volume de água e extravasam uma parte dele para o aquífero. Já na seca, os aquíferos são responsáveis por manter uma certa vazão, contribuindo com parte do volume do escoamento direto. Com o rebaixamento do nível do lençol freático, essa troca fica prejudicada: na seca o volume de escoamento direto dos canais superficiais diminui muito e rios correm o risco de secar.

Tucci (2016) indica outros efeitos da urbanização: o aumento da erosão devido ao aumento da energia da velocidade do escoamento superficial, bem como a deterioração da qualidade da água devido ao transporte de poluentes nos sedimentos, resíduos sólidos urbanos e contaminação aérea de produção industrial e das emissões do transporte urbano e associado aos sedimentos e a lavagem das superfícies urbanas. Todos esses problemas elencados terão grande impacto final na qualidade do meio ambiente urbano.

3.2 SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA

O Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas do Distrito Federal (Adasa, 2018) estabelece que os sistemas de drenagem urbana devem ser projetados de forma integrada ao planejamento urbano, com a finalidade de garantir a sustentabilidade das ações de prevenção e controle de riscos hidrológicos. Segundo o mesmo, a concepção desses sistemas, desde o planejamento, projeto, construção até a operação, deve ter como objetivo tanto a redução de inundações e alagamentos quanto o controle da poluição hídrica. Nesse tópico, serão apresentadas algumas definições de sistemas de drenagem urbana sob diferentes lentes.

Adasa (2018) destaca algumas particularidades dos sistemas de drenagem urbana, que serão explanadas a seguir.

Esses sistemas, por natureza, solucionam um problema de alocação de espaço. Inevitavelmente o escoamento irá acontecer nos eventos de chuva, portanto ele deve ser ordenado no espaço de forma a evitar que cause danos ao meio urbano e, posteriormente, ao meio ambiente. Além disso, a eficiência do sistema só pode ser testada em uma parte do ano, na ocorrência de chuvas, diferente dos outros sistemas de saneamento que são utilizados e testados constantemente. No resto do tempo, em que não ocorrem chuvas, esses sistemas ficam, a princípio, inutilizados (Adasa, 2018).

Outro aspecto característico desses sistemas é que eles devem ser pensados na totalidade da área da bacia hidrográfica na qual estão inseridos, pois interferências pontuais podem causar efeitos adversos a jusante. Nesse sentido, as soluções devem ser pensadas de forma integrada em toda a bacia, desde os lotes, as áreas públicas e o sistema de microdrenagem, até o sistema de macrodrenagem, os rios, canais e lagos (Adasa, 2018).

A integração dos sistemas de drenagem com os outros sistemas de saneamento é essencial para o equilíbrio e eficiência dos mesmos, uma vez que estes possuem influência direta uns sobre os outros. Essas interferências são especialmente observadas no âmbito da poluição de corpos hídricos urbanos e da oferta de água para abastecimento. As falhas no funcionamento de sistemas de esgoto causam um aporte de efluente de esgoto não tratado sendo despejado na rede de drenagem e, conseqüentemente, uma perda de qualidade nos corpos hídricos. Da mesma maneira, falhas no sistema de coleta de resíduos sólidos geram uma carga de poluentes nas águas pluviais. Por sua vez, a qualidade de água dos corpos hídricos afeta no fornecimento de água dos sistemas de tratamento de água para consumo,

gerando uma cadeia. Finalmente, quando o sistema de drenagem não é pensado na integralidade da bacia hidrográfica, a recarga de aquíferos é prejudicada, podendo diminuir ainda mais a disponibilidade de água para abastecimento, especialmente em regiões de baixa garantia hídrica, como o DF (Adasa, 2018).

Na concepção tradicional, os sistemas de drenagem urbana consistem na implantação de canais e galerias de águas pluviais destinados a coletar a água de escoamento superficial e conduzir para os corpos hídricos receptores, procurando minimizar a ocorrência de alagamento e inundações causadas pela urbanização. Segundo Baptista (2011), os chamados “sistemas clássicos de drenagem” constituem basicamente dos seguintes dispositivos de micro e macrodrenagem: sarjetas das ruas, bocas de lobo e condutos, usualmente enterrados, que coletam e conduzem a água de escoamento (micro) e as galerias, canais abertos ou condutos enterrados de grande porte (macro) que recebem o aporte de água do sistema de microdrenagem. Além desses dispositivos, pode haver algumas obras complementares como bueiros, dissipadores de energia e estações elevatórias.

Esses sistemas tradicionais conseguem resolver superficialmente os problemas de drenagem, porém inevitavelmente se têm diversas influências sobre o ciclo hidrológico natural e, portanto, eles devem ser pensados de maneira integrada na bacia hidrográfica. Os sistemas tradicionais têm a característica de proporcionar um rápido escoamento das águas pluviais captadas na área urbana, sem levar em consideração os impactos que acarretarão no corpo receptor a jusante (Adasa, 2018). A rede de drenagem urbana do Distrito Federal é majoritariamente composta por sistemas tradicionais, dimensionados para o escoamento rápido de águas para longe dos centros urbanos (GDF, 2009).

O sistema de drenagem deve funcionar de maneira integrada, de modo que intervenções sejam pensadas em todos os níveis: nos lotes, nas áreas públicas, no sistema de microdrenagem, no sistema de macrodrenagem, nos rios, canais e lagos. Intervenções pontuais devem considerar os seus efeitos sobre toda a bacia, pois poderão trazer impactos negativos à jusante.

3.3 MEDIDAS SUSTENTÁVEIS EM DRENAGEM URBANA

Medidas sustentáveis tem sido empregadas de forma a atender todos os objetivos dos sistemas de drenagem e manejo de águas pluviais. Segundo Tucci (2016), elas permitem reduzir o volume de água que escoar para jusante, reestabelecer a recarga e reduzir a carga

de poluentes, além de promover a infiltração de parcela ponderável da chuva que cai sobre as propriedades. Esse tipo de projeto é pouco conhecido e ainda enfrenta resistência no mercado brasileiro, porém é amplamente estudado e utilizado internacionalmente, tomando como referência o desenvolvimento dessas tecnologias no Reino Unido, Austrália, EUA e Suécia. Neste tópico será feito um aprofundamento relativo a algumas dessas práticas.

3.3.1 SuDS – Reino Unido

A CIRIA, associação de pesquisa e informação do Reino Unido, explica a importância de se empregar os SuDS (*Sustainable Drainage Systems*). Os SuDS são sistemas projetados para maximizar as oportunidades e benefícios do manejo de águas superficiais. Esses sistemas se baseiam no conceito de fazer o manejo e o uso das águas pluviais perto do próprio local onde ela precipita, na superfície e com incorporação da vegetação. Dessa maneira, podemos obter quatro principais tipos de benefícios: manutenção da qualidade da água com prevenção da poluição; controle da quantidade de água, dando suporte à prevenção de risco de inundação e contribuindo para manutenção do ciclo natural da água; amenidade no meio urbano, criando ambientes melhores para as pessoas viverem; e por fim manutenção da biodiversidade, criando ambientes melhores para preservação da fauna e flora (Woods Ballard *et al.*, 2015).

Segundo CIRIA, para projetar esse tipo de sistema é necessário passar inicialmente por uma definição dos objetivos estratégicos das novas construções. Para isso devem ser observados os instrumentos e políticas de planejamento locais bem como os padrões e critérios de aprovação desses projetos no local. Além disso, deve ser avaliado o potencial de impacto ambiental e o mapeamento de risco de inundação. O design dos SuDS se inicia com a caracterização do espaço: levantamento da topografia, da existência de linhas de fluxo e pontos de descarga do escoamento atual, avaliação do potencial de infiltração, levantamento de potenciais novos pontos de descarga da água superficial, riscos de inundação na área, uso do solo, infraestruturas já instaladas, tanto acima como abaixo do solo, tipos de solo, biodiversidade e habitats locais e paisagem natural (Woods Ballard *et al.*, 2015).

São exemplos de componentes de SuDS: sistemas de cultivo que fazem irrigação utilizando águas pluviais captadas em superfícies impermeabilizadas; telhados verdes; pavimentos permeáveis; sistemas de bio-retenção; arborização; vales, bacias de retenção,

lagoas e *wetlands*; e bacias de infiltração (Woods Ballard *et al.*, 2015). A Tabela 3.1 descreve e indica quais as vantagens de cada um desses tipos de componentes.

Tabela 3.1 – Tipos de componentes de SuDS e os critérios atendidos nos diferentes projetos (Adaptado de Woods Ballard *et al.*, 2015).

Tipo de componente	Descrição	Mecanismo de coleta	Critérios de projeto					
			Quantidade de água		Qualidade da água	Amenidade	Biodiversidade	
			Escoamento de pico	volume de escoamento				
				Eventos pequenos				Eventos de cheia
Cultivo com água de chuva	Sistemas de coleta e direcionamento para uso de água da chuva em edificações ou superfícies pavimentadas	P		●	●		●	
Telhado verde	Camada de solo com vegetação no telhado de edificações que desaceleram e armazenam águas pluviais	S	○	●		●	●	●
Sistemas de infiltração	Sistemas que coletam e armazenam o escoamento permitindo que ele infiltre no solo	P	●	●	●	●	●	●
Sistemas de tratamento	Estruturas enterradas projetadas para promover o tratamento do escoamento	P				●		
Faixas de filtração	Faixas de grama que promovem a sedimentação e filtração à emdida em que o escoamento é transportado pela superfície	L		●		●	○	○
Drenos de filtração	Trincheiras rasas preenchidas com pedras que promovem a atenuação, condução e tratamento do escoamento	L	●	○		●	○	○
Vales	Canais com vegetação usados para conduzir e tratar o escoamento	L	●	●	●	●	●	●
Sistemas de biorretenção	Depressões suaves na paisagem que permitem o alagamento temporário da água na superfície, antes que ela infiltre pela vegetação e pelo solo abaixo	P	●	●	●	●	●	●
Árvores	Árvores inseridas em cavidades usadas para coletar, armazenar e tratar o escoamento	P	●	●		●	●	●
Pavimentos permeáveis	Calçamento utilizando estruturas através das quais o escoamento pode ser absorvido e armazenado na sub-superfície e/ou pode ser infiltrado para as camadas inferiores	S	●	●	●	●	○	○
Reservatórios de amortecimento	Espaços grandes, reservados, abaixo do chão, usados para armazenar temporariamente o escoamento antes de infiltrar, usar ou liberar controladamente	P	●					
Bacias de detenção	Depressões com vegetação que armazenam e tratam a água de escoamento	P	●	●		●	●	●
Lagos e wetlands	Lagoas ou poças de água permanentes usadas para facilitar o tratamento do escoamento - escoamento também pode ser armazenado em uma zona de atenuação acima da poça	P	●					

Legenda

P - pontual, L - lateral, S - superficial, ● - provável contribuição relevante no critério de projeto, ○ - algum potencial de contribuição para alcance do critério, se especificamente incluso no projeto

3.3.2 LIDs

Low Impact Development (LID) é um termo utilizado para descrever uma abordagem sustentável do manejo de águas pluviais com ênfase na conservação e proteção da qualidade da água. Estão se tornando mais comuns em novas áreas em desenvolvimento e também sendo implementadas em espaços já consolidados a fim de promover a infiltração, reduzir o escoamento superficial e melhorar a recepção de águas com qualidade. Dessa maneira, dispositivos de LID são tipicamente usados para interceptar, armazenar e infiltrar uma parcela de águas pluviais antes que ela atinja o sistema de transporte (CHI, 2017).

O objetivo maior do LID é a preservação do ciclo hidrológico de pré-desenvolvimento. Em contraste com sistemas tradicionais de drenagem, a abordagem do LID emprega um cuidado maior nas fases de planejamento, antes da elaboração dos projetos de sistemas de drenagem urbana. O propósito desse projeto é preservar ao máximo as condições naturais e, quando as modificações forem necessárias, impor menos impacto para os solos, para a vegetação e para os sistemas aquáticos da área (Dietz, 2007).

Dietz (2007) fez uma revisão das principais práticas de LID empregadas nos Estados Unidos:

Biorretenção – áreas de biorretenção, ou jardins de chuva, são depressões na paisagem, geralmente plantadas, utilizadas para o armazenamento de águas pluviais advindas do escoamento superficial. Apresentam eficiência na remoção de muitos poluentes e na redução do volume do escoamento. (Dietz 2007). A biorretenção pode ter diversas formas de aplicação, como as células de biorretenção e os jardins de chuva exemplificados na Figura 3.2.



(a)



(b)

Figura 3.2 – Exemplos de aplicação de biorretenção: a. Células de biorretenção; b. Jardins de chuva (Rossman, 2015).

Telhado verde - camada de solo e vegetação acima dos telhados. Inicialmente concebido como uma camada grossa com imposição de grandes cargas e complicações estruturais para a edificação, porém hoje tem se desenvolvido para uma tecnologia fina e leve com espécies selecionadas. Retém a precipitação tanto no próprio armazenamento quanto indiretamente por meio da evapotranspiração (Dietz, 2007). Alguns exemplos de aplicação dessa tecnologia podem ser observados na Figura 3.3.



Figura 3.3 – Exemplos de aplicação de telhados verdes (Woods Ballard, B., *et al*, 2015).

Pavimentos permeáveis - alternativas ao asfalto e concreto, utiliza variados tipos de calçamento da superfície (blocos ou grades de concreto, grades de plástico, asfalto permeável, concreto permeável) com o objetivo de aumentar a permeabilidade do solo. A Figura 3.4 ilustra um exemplo de aplicação de pavimento permeável utilizando blocos vazados de concreto.



Figura 3.4 – Exemplo de aplicação de pavimento permeável em estacionamento utilizando blocos de concreto vazado (Costa, 2007).

3.3.3 Bacias de retenção, retenção e/ou infiltração

As bacias de retenção são estruturas de acumulação temporária e/ou de infiltração de águas pluviais que tem por objetivo atender a três principais necessidades no manejo de águas pluviais urbanas: controlar as inundações, amortecendo a geração de cheias no meio urbano; reduzir o volume de escoamento superficial, no caso de bacias de infiltração; reduzir a carga de poluição difusa das águas pluviais (Baptista, 2005).

Consiste em uma estrutura com um volume livre para armazenamento da água de escoamento, controlado por uma estrutura hidráulica de saída e um vertedor de emergência. A estrutura de saída geralmente consiste em uma descarga de fundo controlada ou não por comportas ou válvulas (Baptista, 2005). O princípio básico desse tipo de estrutura é o armazenamento de um grande volume de águas advindas do escoamento superficial urbano com o objetivo de amortecer as cheias. Dependendo das variações no projeto, ela pode exercer complementarmente a função de melhoria da qualidade da água de escoamento e/ou de infiltração para redução do volume de cheia. As bacias de infiltração têm a característica de não serem impermeabilizadas. Já a bacia de retenção difere da de retenção pela posição do dispositivo de saída. Ao colocar a saída na parte superior, é potencializada a função de melhoria da qualidade da bacia, pois favorece o processo de sedimentação liberando a água superficial (mais limpa).

Campana *et al.* (2007) analisaram a eficiência no controle de inundações de duas bacias de retenção, uma seca e outra alagada, sob os aspectos quantitativo e qualitativo do escoamento proveniente da rede de drenagem pluvial da cidade de Brasília/DF. Esses dispositivos são medidas bastante difundidas em áreas de ocupação muito densa, onde não se tem espaços relativamente grandes necessários à implementação de medidas que favorecem a infiltração. Os estudos já desenvolvidos por simulação matemática concluem que as bacias de retenção se apresentam como alternativa viável do ponto de vista da redução dos picos dos hidrogramas de cheia (Campana *et al.*, 2007).

A bacia alagada analisada está localizada no Parque da Cidade de Brasília, servindo a uma função urbanística além de fazer o controle de inundações. É importante notar que essa bacia também funciona como uma bacia de retenção. Ela ocupa uma área de 16,7ha e recebe contribuição de uma área de drenagem de 612ha. A composição da área de drenagem é majoritariamente de área gramada, em parque ou cerrado, ocupando 328ha. Além disso tem-se uma contribuição de 11ha de área comercial, 228ha de área residencial e 45ha ocupado pelo sistema viário, incluindo passeios e calçadas (Campana *et al.*, 2007).

Com relação à bacia seca, destaca-se que a mesma foi desmanchada devido à realização de obras no sistema viário na região e atualmente não está mais em funcionamento. A bacia seca foi construída ao final do bairro Asa Norte, com uma área de contribuição de 475ha e ocupando espaço de 24ha. Assim como a primeira, esta bacia recebia principalmente contribuição de área gramada, parque e cerrado, representando 268ha da área drenada, além de 64ha de área comercial, 105ha de área residencial e 38ha de ocupação do sistema viário (Campana *et al.*, 2007) A Figura 3.5 mostra a localização das bacias monitoradas no estudo no ano de 2007.

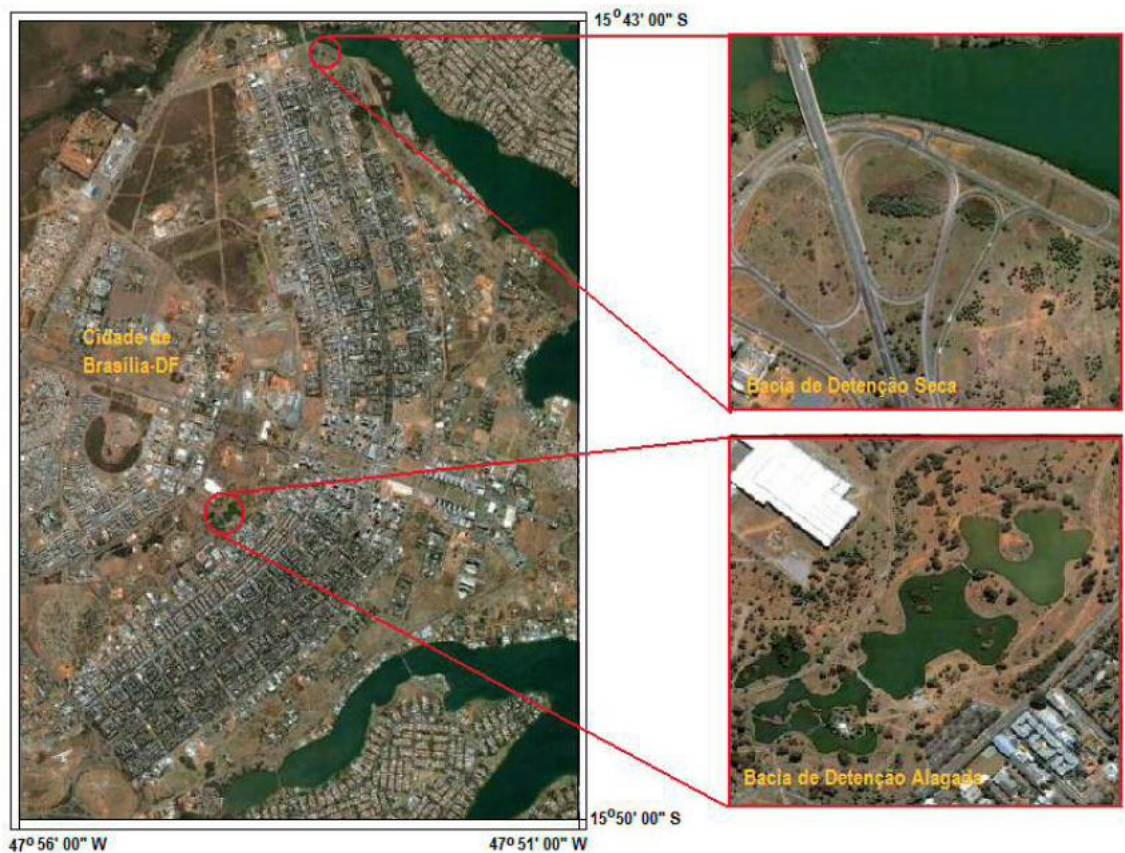


Figura 3.5 – Localização das bacias monitoradas (Campana *et al.*, 2007)

Em ambos os casos se observou grande eficiência hidráulica, com redução de 62,6% e 74% das vazões de pico das ondas de cheia para a bacia de retenção seca e alagada, respectivamente. No que se refere à redução da poluição difusa, observou-se uma maior eficiência na remoção de material com características de material em suspensão (sólidos em suspensão, óleos e graxas) do que na remoção de materiais com características de material em solução (representada pelo monitoramento dos parâmetros DQO, DBO, nitrato, orto-fosfato e organismos coliformes). Isso se deve ao próprio processo de

remoção, que nesses sistemas funciona predominantemente como processo físico. A retenção de poluentes foi mais eficiente na bacia alagada (Campana *et al.*, 2007).

3.3.4 Trincheiras de infiltração e/ou retenção

As trincheiras de infiltração são dispositivos destinados a captação das águas pluviais de afluência perpendicular a seu comprimento, com a finalidade de promover a infiltração e/ou armazenamento temporário. Consistem em estruturas cavadas e preenchidas com material granular graúdo, implementadas junto à superfície ou a pequena profundidade. Usualmente possuem dimensões de largura e profundidade reduzidas, em contraste com as dimensões longitudinais, mais significativas. Dessa forma, são caracterizadas como técnicas compensatórias lineares, podendo ser aplicadas de maneiras variadas em canteiros centrais e passeios, ao longo do sistema viário, em estacionamentos, jardins, terrenos esportivos e em áreas verdes em geral (Baptista, 2005).

A evacuação das águas armazenadas nas trincheiras pode ser feita por infiltração no solo por meio de sua base e das paredes laterais, caracterizando uma trincheira de infiltração, ou por descarga no meio natural ou no sistema de drenagem, caracterizando uma trincheira de retenção. No primeiro caso, os dispositivos contribuem para redução dos volumes escoados superficialmente e no segundo a finalidade da obra é simplesmente o amortecimento das vazões escoadas (Baptista, 2005).

Moreira *et al.* (2017) propõem a utilização de trincheiras de infiltração combinadas com uma técnica de células de armazenamento e infiltração na concepção de sistema viário combinado com o sistema de drenagem em um novo projeto urbanístico que está sendo desenvolvido para a cidade de Belo Horizonte. O projeto procura manter os processos hidrológicos em condições as mais próximas possíveis da situação de pré-urbanização. O sistema de microdrenagem utiliza técnicas compensatórias com foco em infiltração, combinadas com os dispositivos clássicos de sistema de drenagem (sarjetas, bocas de lobo e redes de condutos). É prevista a instalação de trincheiras abaixo das faixas verdes ao longo de toda a extensão das vias (Figura 3.6). A adoção dessa medida, combinada com a utilização das células de armazenamento e infiltração, permitem ganhos significativos em termos de realimentação do lençol subterrâneo (Moreira *et al.*, 2017).

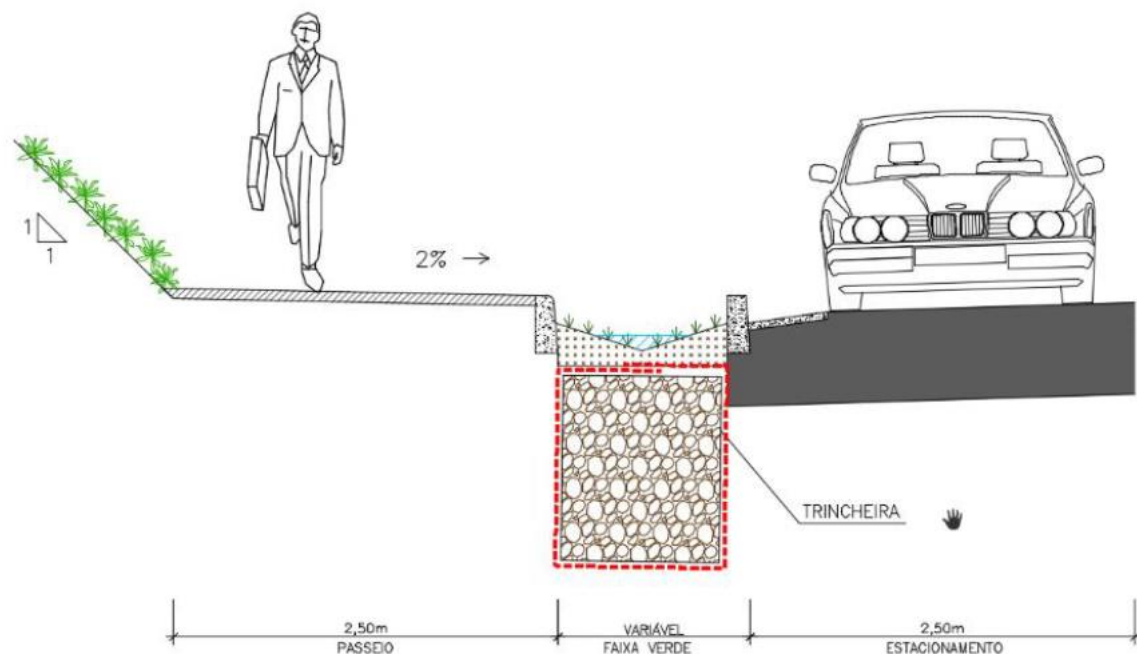


Figura 3.6 - Trincheira de infiltração associada ao sistema viário (Moreira *et al.*, 2017)

3.3.5 Pavimentos permeáveis

A utilização de pavimentação alternativa ao concreto e asfalto pode contribuir para a redução da velocidade de escoamento superficial, amortecimento das vazões e promoção da infiltração da água precipitada, com consequente redução do volume de escoamento. Essa técnica consiste na utilização de materiais que permeabilizam a superfície do solo em vias de trânsito e em estacionamentos.

Araújo *et al.* (2000) simularam a eficiência de pavimentos permeáveis e semi-permeáveis no quesito de redução do escoamento superficial, comparando o escoamento gerado com o solo compactado. O estudo calculou o coeficiente de escoamento para seis diferentes tipos de cobertura da superfície: solo compactado, concreto (solo impermeabilizado), “blockets” de concreto (semi-permeável), paralelepípedos (semi-permeável), concreto poroso (permeável) e blocos vazados (permeável) (Tabela 3.2). A utilização dos dois últimos materiais praticamente não gerou escoamento, mostrando que esses pavimentos, não apenas mantêm as condições originais de geração de escoamento superficial, mas podem reduzir estes valores a praticamente zero, dependendo das condições antecedentes e da capacidade do reservatório de pedras. Os pavimentos semi-permeáveis, por sua vez, mostraram eficiência na redução do escoamento em comparação com o concreto, inclusive, no caso dos paralelepípedos, o escoamento foi bastante inferior ao dos “blockets” e ainda

foi menor do que do solo compactado. Sendo assim, esse tipo de revestimento pode ser utilizado em algumas áreas urbanas para minimizar o impacto da urbanização na geração de escoamento (Araújo *et al.*, 2000).

Tabela 3.2 - Coeficientes de escoamento superficial para diferentes tipos de pavimentos (Adaptado de Araújo *et al.*, 2000)

Revestimento superficial	Coeficiente de escoamento
Solo compactado	0,66
Concreto	0,95
Bloco de concreto	0,78
Paralelepípedo	0,6
Concreto poroso	0,005
Blocos vazados	0,03

Segundo Araújo, *et al.* (2000), esse dispositivo possui algumas limitações. A aplicação dos mesmos deve observar o nível o lençol freático, pois pode proporcionar uma poluição das águas subterrâneas. Além disso, é necessário que seja feita uma construção e manutenção regular dos dispositivos pois a falta desse controle pode provocar entupimentos dos poros e a consequente perda de eficiência.

A Norma Brasileira nº 16.416/2015 estabelece os requisitos mínimos exigíveis nos projetos, especificações, execução e manutenção de pavimentos permeáveis de concreto. Esses pavimentos podem ser construídos com revestimentos de peças de concreto intertravadas, placas de concreto ou pavimento de concreto moldado no local. A norma determina que o coeficiente de permeabilidade do pavimento recém construído deve ser no mínimo 0,001m/s, devendo ter uma espessura mínima de 80mm para peças de concreto intertravado em áreas de tráfego leve. Além disso, a mesma dá as recomendações para manutenção e limpeza das estruturas, de modo a prevenir a contaminação do solo e a perda de permeabilidade do dispositivo.

3.4 BASES LEGAIS

Segundo Tucci (2016) é possível identificar dois níveis de regulação para a drenagem urbana no Brasil. O primeiro é a regulação em nível nacional, estadual ou estabelecida pelo Plano de Bacia Hidrográfica, que pode estabelecer critérios a serem atendidos pelos municípios, titulares da prestação do serviço de águas pluviais. O segundo é a regulação no

nível da cidade sobre os impactos dentro da mesma, que é elaborada com objetivo de atingir objetivos internos, porém sem causar impactos a jusante da bacia.

A Lei das Águas, Lei Federal Nº 9.433, de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, estabelece alguns instrumentos de gestão no nível externo ao da cidade. São estes: os Planos de Recursos Hídricos, o enquadramento dos corpos d'água em classes e a outorga dos direitos de uso dos recursos hídricos. O enquadramento e a outorga regulam sobre o uso da água, o aumento de vazão e a qualidade da água (Tucci, 2016).

Essa lei (Brasil, 1997) define os Planos de Recursos Hídricos como planos diretores que visam a fundamentar e orientar a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e o gerenciamento dos recursos hídricos. Nesse sentido, eles deverão fazer um diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos na bacia hidrográfica e criar cenários e análises para o futuro, considerando as modificações no espaço, as disponibilidades e demandas futuras, tanto sob a lente da quantidade quanto da qualidade. Com isso, são definidas as metas e medidas que devem ser tomadas em prol da racionalização do uso, do aumento da quantidade e melhoria da qualidade dos recursos hídricos disponíveis.

O enquadramento é um instrumento voltado para a manutenção da qualidade dos recursos hídricos e estabelece as classes dos corpos hídricos segundo os seus usos preponderantes, por meio dos parâmetros de qualidade. A outorga por sua vez assegura o controle sobre o impacto dos empreendimentos e modificações sobre os corpos hídricos, sendo que a Lei considera outorgáveis os usos que, dentre outros, alterem o regime, a quantidade ou a qualidade da água existente em um corpo de água (Brasil, 1997).

A Lei Federal Nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, também dá diretrizes e regulamenta, em nível nacional, a drenagem urbana. Ela define que o conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais de drenagem e manejo das águas pluviais, limpeza e fiscalização preventiva das respectivas redes urbanas estão dentro do domínio do saneamento básico, serviço público que deverá ser prestado com base em uma série de princípios fundamentais, como o da integralidade, da segurança, qualidade e regularidade, da disponibilidade de serviços adequados à saúde pública e à segurança da vida, entre outros. A lei prevê a elaboração do Plano de Saneamento Básico. Esse plano deverá incluir o Plano de Drenagem Urbana, que por sua vez deve respeitar as determinações do Plano de Bacia com relação às alterações de qualidade e quantidade dos corpos hídricos.

Segundo a Lei Nº 11.445/2007, os titulares dos serviços públicos de saneamento básico poderão delegar a organização, a regulação, a fiscalização e a prestação dos serviços de saneamento. Dentre as obrigações impostas pela lei a essas entidades, destacam-se:

- prestar diretamente ou autorizar a delegação dos serviços e definir o ente responsável pela sua regulação e fiscalização, bem como os procedimentos de sua atuação;
- adotar parâmetros para a garantia do atendimento essencial à saúde pública;
- fixar os direitos e os deveres dos usuários;
- estabelecer mecanismos de controle social;
- estabelecer sistema de informações sobre os serviços; entre outros.

No Distrito Federal a Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do DF – Adasa trata da regulação e fiscalização, bem como da emissão de outorga de recursos hídricos. Dentre os instrumentos de regulamentação na área de drenagem urbana, destacam-se as seguintes publicações da Adasa: o Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal e a Resolução Nº 09, de 08 de abril de 2011.

3.4.1 Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal

O Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal (PDDU-DF) é o instrumento de planejamento que trata da drenagem e manejo de águas pluviais em área urbana no Distrito Federal. Foi consolidado nos anos de 2008 e 2009, tendo como produtos:

- Dois manuais técnicos para orientar no planejamento, implantação e gerenciamento dos sistemas de drenagem urbana;
- Dois relatórios de caracterização, elaborados no âmbito dos estudos preliminares do PDDU-DF, a fim de caracterizar a situação corrente do sistema de drenagem urbana e dos problemas que afetam ou são afetados pela sua eficiência;
- Um diagnóstico detalhado do sistema de drenagem urbana do DF, abrangendo a revisão dos estudos hidrológicos do DF e a modelagem da rede de macrodrenagem, com simulação do funcionamento segundo cenários preestabelecidos;

- Um plano de modernização para a gestão do sistema de drenagem urbana, partindo de um diagnóstico da situação corrente e definindo estratégias para a implantação do novo plano diretor;
- Planos de gestão e de informação, definindo claramente as ações necessárias à modernização do sistema de drenagem, incluindo o desenvolvimento de um sistema de informações geográficas, fundamental para a implementação futura das ações preconizadas no âmbito do PDDU-DF.

Dentre os conteúdos elaborados no âmbito do PDDU, destaca-se o Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas do Distrito Federal, que foi revisado e ampliado pela Adasa, com a última versão publicada em 2018. Este manual possui caráter normativo e serve, não apenas como ferramenta para as atividades regulatórias da Adasa, mas também constitui ferramenta de desenvolvimento técnico e institucional para auxiliar todos profissionais que planejam, projetam, implementam e aprovam empreendimentos que envolvem drenagem urbana em Brasília (Adasa, 2018).

O Manual de Drenagem apresenta os critérios para estudos de concepção e projetos de sistemas de drenagem no Distrito Federal dentro de uma visão integrada do manejo das águas pluviais, indicando diretrizes tanto para a ampliação do sistema de drenagem, em consonância com a expansão urbana, como para a adequação do sistema de drenagem existente em áreas já urbanizadas e sujeitas a alagamentos e inundações (Adasa, 2018).

3.4.2 Resolução N°. 09/2011 – Adasa

Com base nas recomendações feitas pelo PDDU-DF (GDF, 2009), a Adasa publicou em 08 de abril de 2011 a resolução N°. 09, definindo a outorga para lançamento de águas pluviais no DF. Por meio desse instrumento, a agência cobra medidas preventivas de qualidade e quantidade de água, tanto aplicado a novas construções como a empreendimentos já implementados, que ficam obrigados a regularizar seu lançamento (Tucci, 2016).

A resolução (Adasa, 2011) estabelece que a outorga para lançamento de águas pluviais deverá observar três aspectos: a vazão máxima gerada pelo empreendimento, a área máxima a ser impermeabilizada pelo empreendimento e a aplicação de medidas de retenção do aumento do escoamento devido ao novo empreendimento. Limita-se a vazão que cada área pode transferir para a rede pública à vazão específica de até 24,4 L/(s.ha), por meio da utilização de estruturas de contenção e retardamento do lançamento. Dessa

maneira, a regulamentação pretende fazer a manutenção da vazão de pré-desenvolvimento, garantindo a manutenção das condições, tanto qualitativas quanto quantitativas, do corpo hídrico equivalentes àsquelas anteriores à ocupação do solo.

Um aspecto primordial que tem gerado discussão com relação à resolução é a questão do usuário que está sujeito a requerimento de outorga. A Adasa (2011) ordena que todos usuários que efetuem lançamento de águas pluviais em corpos hídricos superficiais, no âmbito do Distrito Federal, deverão requerer a regularização, salvo situações especiais como dos terrenos com área inferior a 600m² destinados a habitação unifamiliar, em que a vazão específica de lançamento poderá ser desconsiderada. De forma consoante, qualquer ônus advindo da implementação e manutenção das estruturas necessárias para essa regularização ficará a cargo dos seus usuários (Adasa, 2011). No entanto, o usuário em geral não está disposto a fazer o investimento necessário para a regularização do seu terreno, principalmente quando o empreendimento já está estabelecido. Ao mesmo tempo a fiscalização ainda é muito falha e não foi capaz de reproduzir o efeito esperado em termos de regularização.

3.5 MODELAGEM HIDROLÓGICA

A modelagem matemática é uma ferramenta de gestão utilizada em diversas áreas para auxiliar a tomada de decisões. Consiste na simulação da fenômenos naturais, a partir de dados e parâmetros e de realização de simplificações da realidade, para a obtenção de resultados hipotéticos, previsão de cenários futuros ou adversos decorrentes de circunstâncias específicas.

Os modelos hidrológicos distribuídos são geralmente utilizados para a simulação de pequenas bacias, onde são representados cada quadra urbana, escoamento na superfície, sarjeta, entrada nos bueiros e rede de águas pluviais. Esse tipo de modelo é suficientemente detalhado para estudar a capacidade de escoamento da rede e verificar as condições de projeto (Tucci, 2007). Segundo Garcia (2005) esse tipo de modelo apresenta melhor desempenho para bacias urbanizadas, pois, estas possuem elevadas heterogeneidades, devido às modificações ocasionadas pelo uso e ocupação do solo.

Segundo Garcia (2005), tem-se desenvolvido diversos aplicativos nas últimas décadas com o intuito de modelar os fenômenos envolvidos na drenagem urbana, como o escoamento superficial e nas redes de condutos e canais, sendo que as simulações apresentam respostas diferentes em função das estruturas e processos de cálculo de cada método.

Souza (2014) destaca alguns dos modelos que permitem simular quantidade e qualidade de água em ambientes urbanizados: DR3M-QUAL, HSPF, SWMM, STORM, Wallingford Model, HEC-5Q, BRASS, QUAL2E– UNCAS e WQRRS. Garcia (2005) afirma que o SWMM é um dos modelos mais utilizado em simulações de drenagem urbana. Por meio dele é possível fazer análises quali-quantitativas dos possíveis problemas de drenagem identificados na rede e comparar com cenários propostos avaliando os resultados de hidrogramas, polutogramas e cargas de poluentes. Dessa maneira, a modelagem fornece insumos para a escolha e estimativa de custo das estruturas de armazenamento e tratamento que podem ser implementadas como alternativas de controle de escoamento.

3.6 SWMM

O SWMM – *Storm Water Management Model* – é um modelo hidrológico-hidráulico bastante difundido, desenvolvido pela U.S. EPA (*United States Environmental Protection Agency*), usado principalmente para simulações em áreas urbanas. Consiste em um modelo chuva-vazão que simula a quantidade e a qualidade do escoamento superficial, tanto em eventos pontuais de chuva quanto em longo prazo, de forma contínua (Rossman, 2012).

O SWMM funciona por interações entre os quatro principais módulos descritores do ambiente: o módulo atmosférico, módulo de superfície do solo, módulo de águas subterrâneas e módulo de transporte. Cada um desses módulos possui objetos para representar e caracterizar o ambiente e assim simular os fenômenos que acontecem no mesmo (Rossman, 2012).

No módulo atmosférico é feita a entrada de precipitação. Essa precipitação interage com o módulo de superfície do solo, que é composto por um conjunto de sub-bacias. A partir daí esse fluxo é exportado para o módulo de águas subterrâneas por meio da infiltração, ou para o módulo de transporte por meio do escoamento superficial e carreamento de poluentes. Esse último módulo por sua vez contém uma série de elementos que transportam a água para os nós exutórios ou para as estações de tratamento (Rossman, 2012).

O componente de escoamento do SWMM opera com um conjunto de áreas de sub-bacias que recebem precipitação e geram escoamento e carga de poluentes utilizando métodos de reservatórios não lineares e as funções de Horton, Green-Ampt ou SCS para infiltração. O módulo de transporte do SWMM leva esse escoamento por um sistema de tubulações, canais, bombas e elementos de regulação. O SWMM monitora a quantidade e qualidade do

escoamento gerado em cada sub-bacia, além da taxa de escoamento, profundidade do escoamento e qualidade da água em cada tubulação e canal em um certo período de simulação dividido em intervalos de tempo (Rossman, 2012).

O presente projeto foi utilizado o método SCS, descrito a seguir, para cálculo da infiltração de água no solo. O SCS é um método experimental utilizado para calcular a precipitação efetiva por meio da equação 4.1, a seguir, onde Q é a vazão de escoamento, P é a precipitação total e S é a capacidade de armazenamento do solo (USDA, 1986).

$$Q = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{P + 0,8 \cdot S} \quad \text{(Equação 4.1)}$$

O principal parâmetro deste método se refere ao CN (Curva Número). A capacidade de armazenamento de água no solo é dada em função do CN (Equação 4.2), parâmetro adimensional que depende do tipo de solo, da condição de umidade antecedente e do uso e ocupação do solo (USDA, 1986).

$$S = 25,4 \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad \text{(Equação 4.2)}$$

Segundo a USDA (1986) esse modelo é aplicável em bacias urbanas de pequeno porte. A classificação do uso e ocupação do solo foi feita a partir da análise de imagens de satélite fornecidas pela Terracap utilizando geoprocessamento.

A interface desse programa também possibilita simular o uso de medidas para redução de impacto, ou LIDs (*Low Impact Development*).

O PCSWMM é um programa que usa como base de cálculos o SWMM, entretanto possui interface amigável com facilidade para explorar recursos como estruturas de drenagem sustentável, modelagem 2D e recursos de calibração de parâmetros (Fileni, 2017).

Costa (2013) fez uma análise do comportamento quantitativo e qualitativo das águas de drenagem urbana da bacia do Lago Paranoá (Brasília/DF) utilizando o modelo SWMM. O estudo também realizou o monitoramento da precipitação e do escoamento superficial em eventos de cheia. Para a simulação no SWMM utilizaram-se os modelos de Chuva/Vazão, de Fluxo e de Qualidade da água nos processos e, para o método de infiltração, foi adotado o SCS, devido à facilidade de obtenção dos dados uma vez que o modelo utiliza o CN como parâmetro principal. Para o modelo de transporte foi utilizado o modelo de Onda Dinâmica, pois este leva em consideração todos os componentes da equação de Saint-

Venant e assim, promove uma simulação mais correta dos fenômenos de escoamento superficial.

O estudo verificou que o modelo SWMM se aplica bem às bacias urbanas estudadas. A simulação chuva-vazão produziu uma boa representação dos fenômenos hidráulicos e hidrológicos que ocorreram na bacia. Verificou-se que o desempenho do modelo na simulação da infiltração para eventos com coeficiente de escoamento diferentes depende da calibração. A aplicação deste método para eventos com coeficiente de escoamento semelhantes é satisfatória, porém, quando esses coeficientes são diferentes, sugere-se a calibração envolvendo mais parâmetros, principalmente aqueles relacionados a precipitação antecedente e infiltração inicial. Para a modelagem das cargas de poluentes, o estudo mostrou que a simulação das cargas de DQO foi satisfatória, para o modelo com vazões calibradas (Costa, 2013).

Fileni (2017) utilizou o SWMM para simular e analisar quantitativamente o escoamento superficial de uma pequena área urbana localizada na Região Administrativa da Ceilândia (Brasília/DF), mostrando que a rede de drenagem implementada provavelmente está subdimensionada. Também se verificou, por meio da modelagem em áreas vulneráveis à inundação, que ocorrem acumulações de água em ruas e avenidas devido às depressões e terrenos de baixa declividade, recorrentes na região. O estudo simulou a incorporação de técnicas de drenagem sustentável no sistema como forma de compensar aos problemas do sistema de drenagem. A aplicação dessas técnicas, feita com diferentes configurações de utilização de bacias de retenção e pavimentos permeáveis, resultou em uma redução da vazão de pico no exutório, do volume total extravasado, do tempo de extravasamento e dos pontos de extravasamento.

Neste trabalho, não foi realizada a calibração e verificação do modelo. No entanto, observou-se um resultado satisfatório, confirmando a tendência esperada no desempenho da rede de drenagem da região nos diferentes cenários simulados. As medidas compensatórias utilizadas tiveram o objetivo de sanar os diferentes problemas averiguados no sistema implementado. O primeiro cenário simulado implementou bacias de retenção ao final da rede de drenagem, conseguindo reduzir a vazão do lançamento a padrões aceitáveis. Porém, a rede também apresentava vários pontos de alagamento e, para isso, foram introduzidos na simulação áreas com pavimentos permeáveis, levando a uma redução do volume total extravasado e dos pontos onde isso ocorreu. Uma terceira

intervenção seria a introdução de bacias amortecedoras ao longo da rede, o que resultou em redução ainda maior do volume extravasado e dos pontos de extravasamento (Fileni, 2017).

Fernandes (2017) utilizou o modelo SWMM para analisar os impactos causados pela urbanização da região da Cidade Estrutural (Brasília/DF), principalmente em relação ao escoamento superficial. O estudo simulou cinco diferentes cenários, comparando a situação antes da urbanização, a atual urbanização sem infraestrutura de drenagem, a atual urbanização com a infraestrutura de drenagem existente, a atual urbanização com implementação da infraestrutura de drenagem proposta pela Novacap e a atual urbanização utilizando alternativas de baixo impacto (LIDs) de forma a complementar o sistema de drenagem existente.

O estudo também utilizou as opções de Chuva/Vazão e Fluxo para os processos, o método SCS para infiltração e o método da onda dinâmica para transporte. Os resultados da simulação mostraram que a utilização de LIDs foi a alternativa que mais aproximou os valores de escoamento superficial do cenário de pré-urbanização. Os outros sistemas de drenagem analisados, o sistema existente e o proposto pela Novacap, se baseiam nos conceitos dos sistemas tradicionais, projetados para drenar a água das cidades e levar a jusante o mais rápido possível. Dessa maneira, ambos mostraram grande aumento da vazão de pico quando comparados ao cenário de pré-urbanização, sendo que a implementação dos sistemas tradicionais de drenagem apenas serviu para retardar e redistribuir a vazão de pico. Não foi possível fazer a calibração do modelo, porém concluiu-se que os resultados da modelagem foram representativos e possibilitaram a comparação entre os métodos clássicos e alternativos de manejo de águas pluviais (Fernandes, 2017).

4 METODOLOGIA

No presente trabalho foi analisado o escoamento superficial gerado na região delimitada dentro da Região Administrativa do Lago Norte por meio de simulações hidrológicas-hidráulicas utilizando o programa PCWMM, tomando como área de análise cinco sub-bacias. A modelagem utilizando o modelo SWMM requer a entrada de uma grande quantidade de dados, que foram organizados de forma a obter resultados satisfatórios. Para isso, foram obtidos dados da topografia da área, uso e ocupação do solo, elementos da rede de drenagem instalada na região, tipo de solo, etc. Não foi possível fazer a calibração do modelo devido à ausência de dados de vazão para o sistema estudado. No entanto, devido à dimensão das bacias relativamente pequena, é possível fazer a estimativa da vazão de pico pelo Método Racional, de modo a verificar a veracidade dos resultados da modelagem computacional.

Com os dados, procedeu-se a simulação hidrológica-hidráulica, possibilitando diagnosticar os possíveis problemas da rede instalada. A partir disso, foi feita uma proposta de aplicação de medidas compensatórias para reduzir a ocorrência dos problemas constatados e melhorar a eficiência do sistema de drenagem urbana da região. O fluxograma da metodologia descrita é mostrado na Figura 4.1. Neste capítulo é feita uma caracterização da área a ser estudada, além da apresentação de cada uma das etapas que levaram à análise do escoamento na região em diferentes cenários.

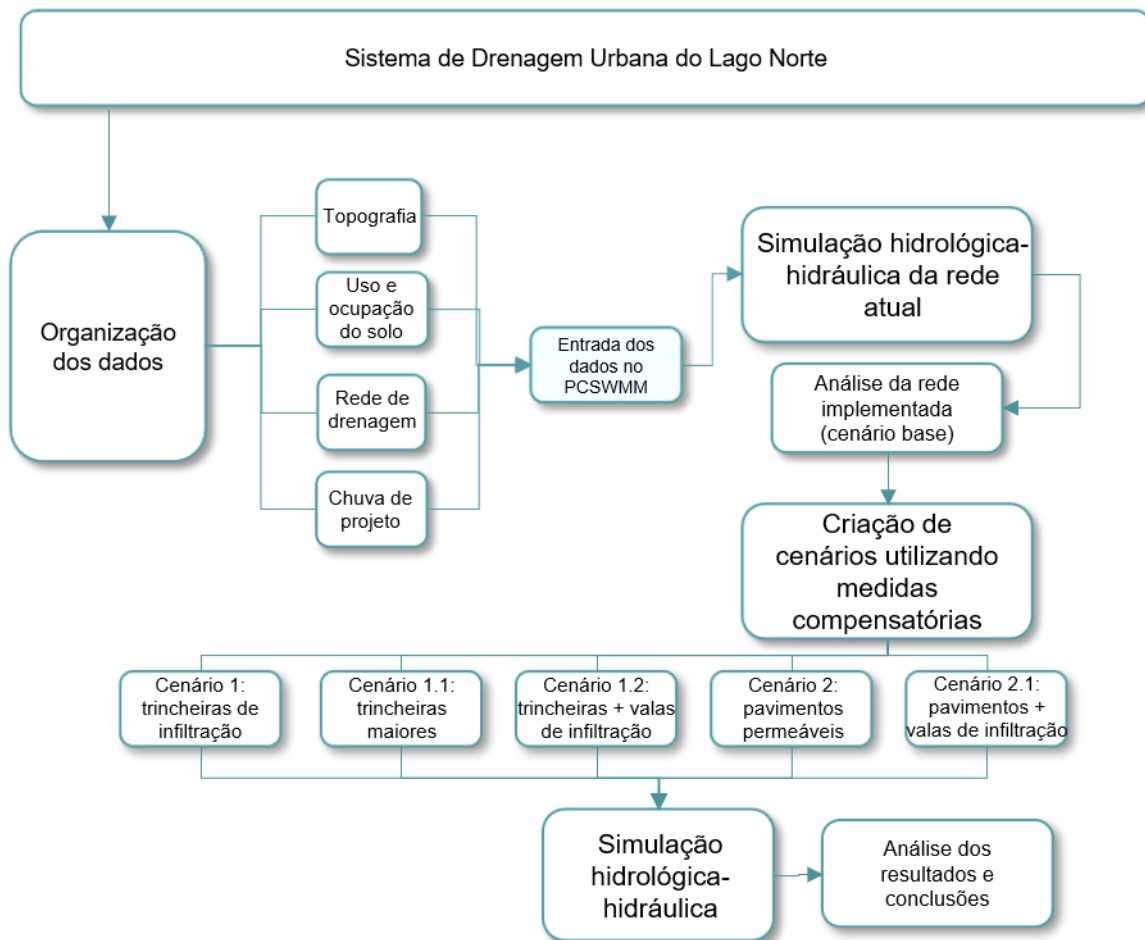


Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia a utilizada.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A região de estudo deste trabalho está delimitada dentro da Região Administrativa do Lago Norte, em Brasília-DF, conforme mostrado na Figura 4.2. Denomina-se como área de estudo a região destacada do mapa, a qual pretendeu-se caracterizar através da análise de sub-bacias delimitadas posteriormente. Essas sub-bacias são intituladas sub-bacias de análise.

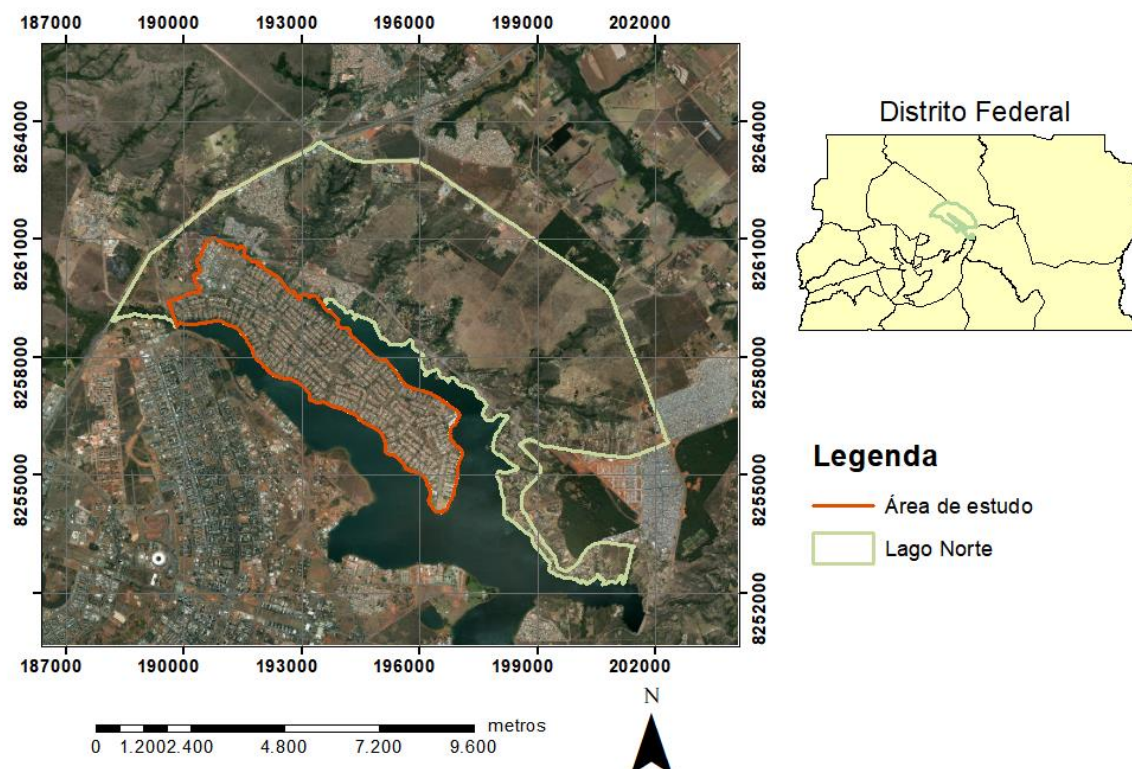


Figura 4.2 – Mapa do Distrito Federal com a localização da região de estudo dentro da Região Administrativa do Lago Norte

A caracterização da área de estudo foi feita como descrito a seguir:

- Caracterização geral da região de estudo, com levantamento de dados sócio econômicos, dados climáticos, solo, vegetação, relevo e hidrografia, por meio de pesquisa bibliográfica, obtenção e análise de dados das bases da Codeplan, Segeth, Emprapa, Adasa e Terracap;
- Caracterização da drenagem na região administrativa do Lago Norte, com obtenção dos dados da rede de drenagem instalada junto à Novacap;
- Delimitação e caracterização das sub-bacias de análise dentro da área de interesse, utilizando processamento de imagens de satélite;

4.1.1 Clima

A região estudada possui um clima predominante de savana, segundo a classificação de Koppen, com uma estação chuvosa concentrada no verão, começando em outubro e terminando em abril. O trimestre de novembro a janeiro possui as maiores concentrações de chuva e de junho a agosto tem-se o período mais seco. A temperatura média anual varia

de 18° a 22° C e a umidade relativa do ar atinge valores entre 20% e 70% no período de seca (Ferrante *et al.*, 2001 *apud* Costa, 2013).

4.1.2 Solo, Vegetação e Relevo

O Distrito Federal situa-se em uma das áreas mais elevadas da Região Centro-Oeste, com uma altitude média de 1.100 metros. A forma de relevo característica da região, inserida no Planalto Central, é a formação das chapadas. O bioma característico é o Cerrado.

A região do Distrito Federal é composta por 13 diferentes classes de solos, sendo que as principais classes são: Cambissolo, Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho-Amarelo, ocupando, respectivamente, 30,98%, 38,92% e 15,58% da área. Os Latossolos são solos altamente intemperizados, profundos, com alta permeabilidade de água, sendo o relevo predominante caracterizado por uma formação residual de aplanamentos, conhecidas como as chapadas. Já os Cambissolos são solos que, em geral, indicam baixo grau de intemperização, estão associados a relevos ondulados e forte-ondulados, variando desde rasos até profundos (entre 0,2 e 1 m), sendo que é indicado que seja destinado à preservação permanente, por se encontrarem em relevos mais íngremes ou serem mais rasos (Reatto *et al.*, 2004).

De acordo com a classificação da Embrapa (Figura 4.3), a região de estudo, assim como a cidade de Brasília e outras áreas urbanizadas, é caracterizada como Área Urbana, onde a cobertura do solo já foi modificada a ponto de perder as características naturais. Para a finalidade deste trabalho foi considerado que o solo das sub-bacias analisadas possui característica de Cambissolo. Esse dado é necessário para o cálculo da infiltração pelo método da Curva-Número e foi assumido analisando os tipos de solo predominante na região.

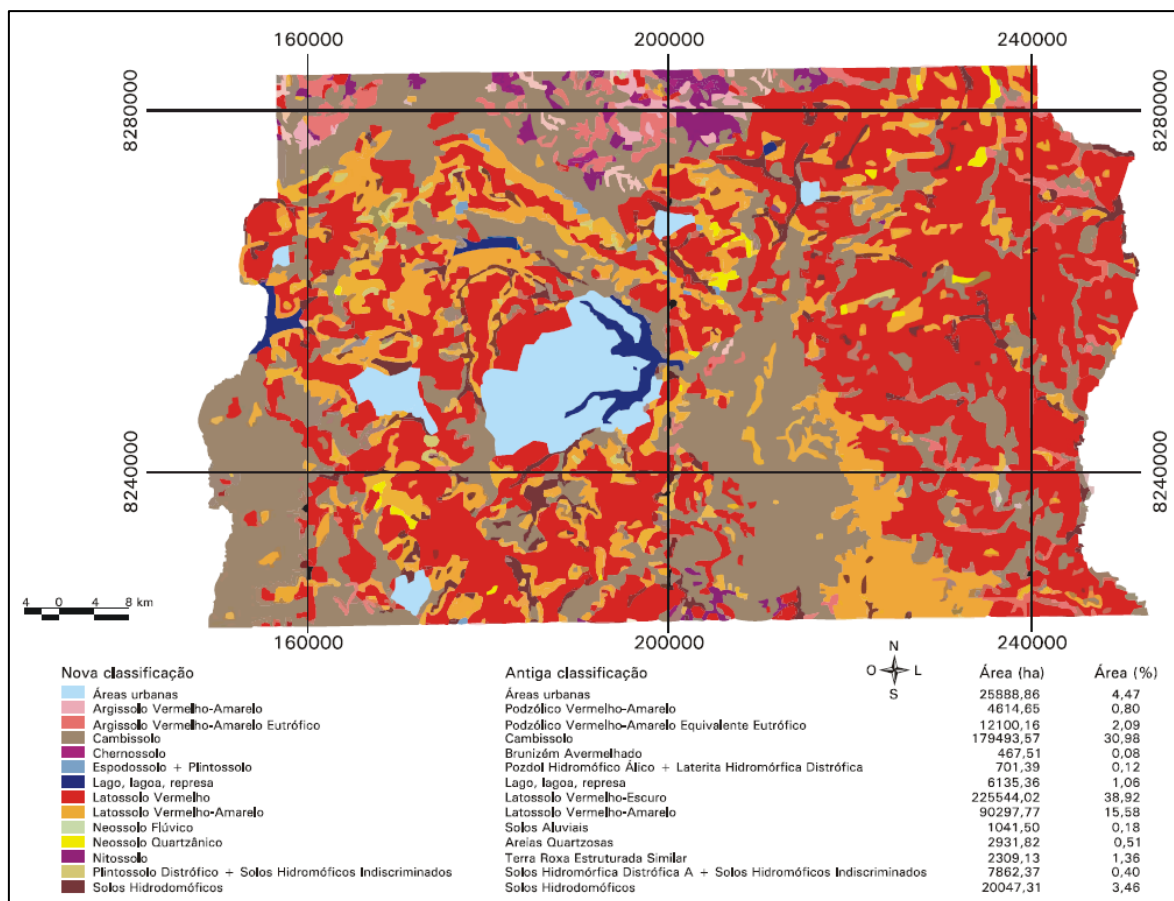


Figura 4.3 – Mapa de solos do Distrito Federal, na escala 1:100.000, com indicação das classes de solos (Reatto *et al.*, 2004)

4.1.3 Hidrografia

O Lago Norte está inserido na Bacia do Lago Paranoá, a qual possui uma área de 1.058 Km² e está dividida em 5 Unidades Hidrográficas (UHs). A região do Lago Norte tem seu território majoritariamente na UH 9 – Lago Paranoá, com uma pequena área inserida na UH 18 – Ribeirão do Torto.

A área de estudo está cercada pelo Lago Paranoá, o maior lago da região do Distrito Federal, que, conseqüentemente, possui grande capacidade de amortecimento do volume gerado no escoamento superficial. O Lago foi criado à época da construção de Brasília, a fim de aumentar a quantidade de água disponível para a região, a partir do represamento do Rio Paranoá, Ribeirão do Torto e Riacho Fundo e outros (Codeplan, 2013).

O Córrego Bananal e o Ribeirão do Torto são dois rios que desaguam próximo à área de estudo, nos braços do Lago Paranoá. O Córrego Bananal nasce no Parque Nacional de Brasília, passa sob a Estrada Parque Indústria e Abastecimento (EPIA) e deságua no Lago

Paranoá, próximo à ponte do Bragueto. O Ribeirão do Torto também tem sua nascente no Parque Nacional de Brasília, desaguando no braço norte do Lago Paranoá.

Próximo à área estudada, foi inaugurada recentemente um ponto de captação emergencial para abastecimento de água no Distrito Federal. O mapa da hidrografia da região com a localização do ponto de captação emergencial é mostrado na Figura 4.4.

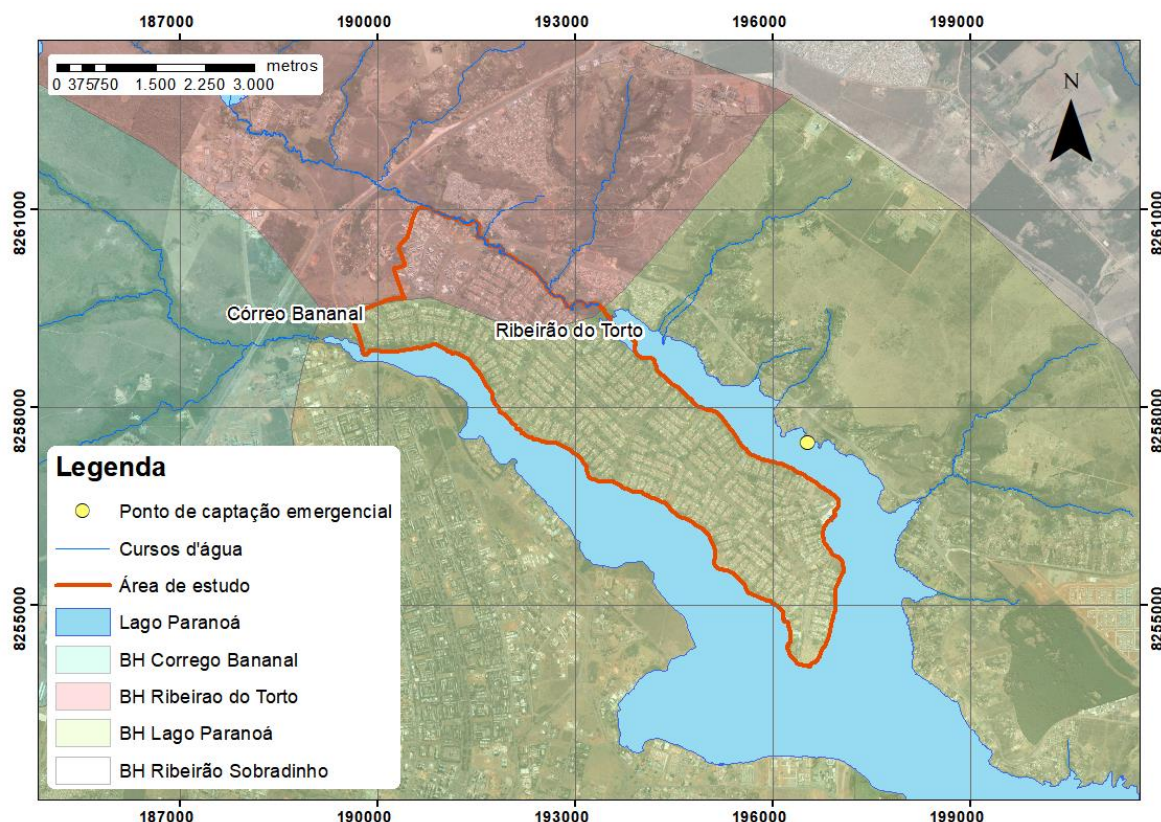


Figura 4.4 – Área de estudo com identificação do ponto de captação emergencial da CAESB e principais cursos d'água

4.1.4 RA Lago Norte

A região administrativa do Lago Norte fica situada na península norte formada às margens do Lago Paranoá. Ela começou a ser ocupada na década de 60, depois do enchimento do Lago (Codeplan, 2016).

Inicialmente, a região do Lago Norte pertencia à Região Administrativa de Brasília. Posteriormente, foi feita a elaboração dos projetos de urbanização da área pela NOVACAP, e a RA foi criada em 1994 pela Lei nº 641/94 e regulamentada pelo Decreto nº 15.516/94. Sua área é composta pelos setores de Mansões do Lago - SML, de Habitação Individual Norte – SHIN, Centro de Atividades, Taquari, Setor de Chácaras e Área

Comercial. Até 2003, abrigava também o Varjão, que se tornou uma RA independente (Codeplan, 2013).

Segundo a Pesquisa Distrital por Amostra de Domicílios – PDAD – 2011/2013/2016, realizada pela Codeplan, a região possuía em 2016 uma população estimada em 37.455 habitantes, com uma taxa média geométrica de crescimento anual de 3,09 entre 2013 e 2016. A população é caracterizada por um perfil socioeconômico de média-alta e alta renda, com uma renda domiciliar média mensal, estimada para 2016, de R\$ 12.598,00. Estima-se que a escolaridade de pelo menos 55% da população seja curso superior completo e que a alfabetização de crianças entre 6 e 14 anos esteja em 100%. Essa área, assim como o Lago Sul e Park Way tem como característica a predominância dos lotes com dimensão superior a 800m², como resultado de uma ocupação extensiva do solo urbano, sendo que a estimativa é de um número médio de 3,08 moradores por domicílio (Codeplan, 2016).

Segundo o PDAD – 2015/2016, no ano de 2016 a rede de água pluvial atendia a 93,91% dos domicílios regularizados e 23,29% dos domicílios não regularizados e o esgotamento sanitário atendia a 93,21% dos domicílios regularizados e 6,85% dos não regularizados. Os domicílios não regularizados representam 15% do total na Região Administrativa do Lago Norte, porém destaca-se que área de estudo selecionada dentro da RA é uma região regularizada.

4.1.5 Drenagem na RA Lago Norte

Segundo o Relatório de Caracterização do Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal (GDF, 2009), a região do Lago Norte possui rede de macrodrenagem parcialmente implantado. Essa região, assim como o Lago Sul, é caracterizada pela proximidade com o Lago Paranoá, corpo receptor de águas pluviais, o que ameniza a problemática da drenagem de águas pluviais na região.

Segundo levantado no Relatório da Diretoria de Urbanização/Novacap (GDF, 2009), até o ano de 2007 a extensão da rede pluvial implantada na região do Lago Norte totalizava 53.175 metros.

4.1.6 Sub-bacias de análise

Foram delimitadas dentro da região de interesse cinco sub-bacias, mostradas na Figura 4.5. As áreas foram escolhidas por apresentarem dados cadastrais da rede de drenagem

consistentes, em detrimento de outras áreas nas quais havia muita informação faltando ou dados errados. Essas sub-bacias foram tomadas como objeto das análises, possibilitando a realização das simulações.

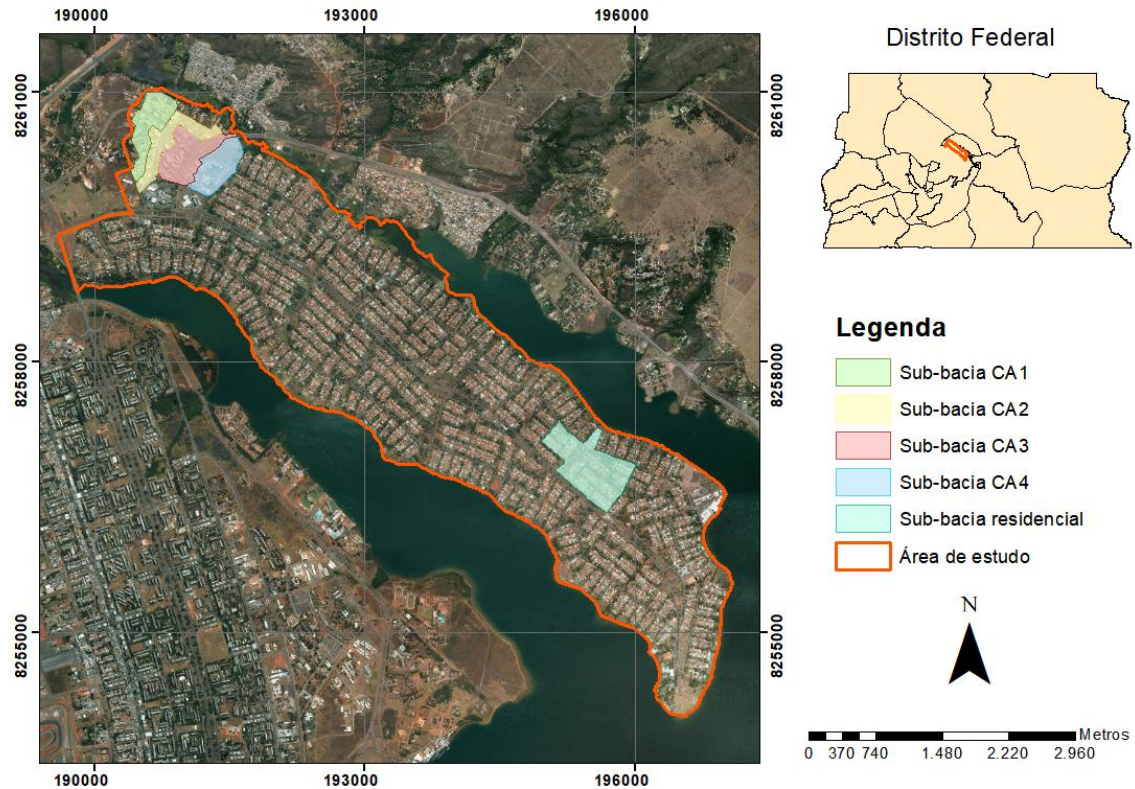


Figura 4.5 – Mapa de localização das sub-bacias de análise do projeto.

Como pode se observar na Figura 4.6, as sub-bacias do Centro de Atividades (CA), localizadas na parte superior da região de estudo, são caracterizadas por ter uma área impermeável maior, com predominância de prédios residenciais e/ou comerciais. Já a sub-bacia Residencial, localizada na porção inferior da região de estudo, aproximadamente na altura da Quadra Interna 11, possui predominantemente ocupação residencial de lotes de aproximadamente 800m². A Tabela 4.1 faz uma relação da área de cada sub-bacia analisada.

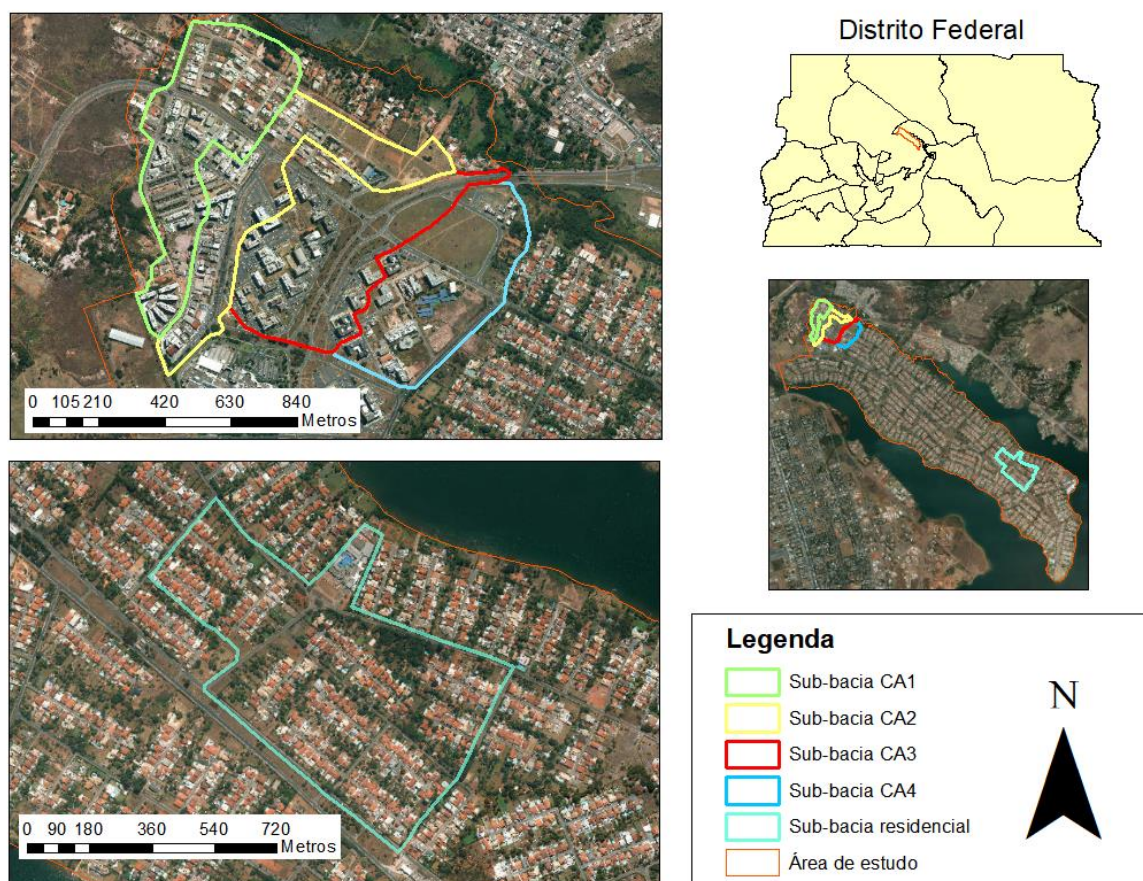


Figura 4.6 – Mapa de delimitação das sub-bacias do projeto.

Tabela 4.1 – Relação das áreas de cada sub-bacia analisada.

Sub-bacias	Área (ha)
Bacia CA1	26,31
Bacia CA2	20,13
Bacia CA3	26,81
Bacia CA4	22,25
Bacia Residencial	46,75

4.2 ESTRUTURAÇÃO DO BANCO DE DADOS

Para atingir os objetivos traçados neste projeto, é necessária a entrada dos dados no modelo hidrológico. Antes disso, foram organizados sistematicamente os dados de entrada, como a topografia, o uso e ocupação do solo, os dados cadastrais da rede de drenagem da área de estudo e a chuva de projeto definida, para posterior análise hidrológica.

4.2.1 Topografia

O Modelo Digital de Elevação do terreno (MDE) foi obtido por meio de processamento de dados disponibilizados pela Secretaria de Estado de Gestão do Território e Habitação (SEGETH). Foram utilizadas as curvas de nível de 1 m obtidas em 1997. As curvas de nível são importantes para permitir a simulação hidrológica-hidráulica e identificar a ocorrência de inundações em depressões do terreno. O mapa de elevação gerado utilizando ferramenta de geoprocessamento é mostrado na Figura 4.7.

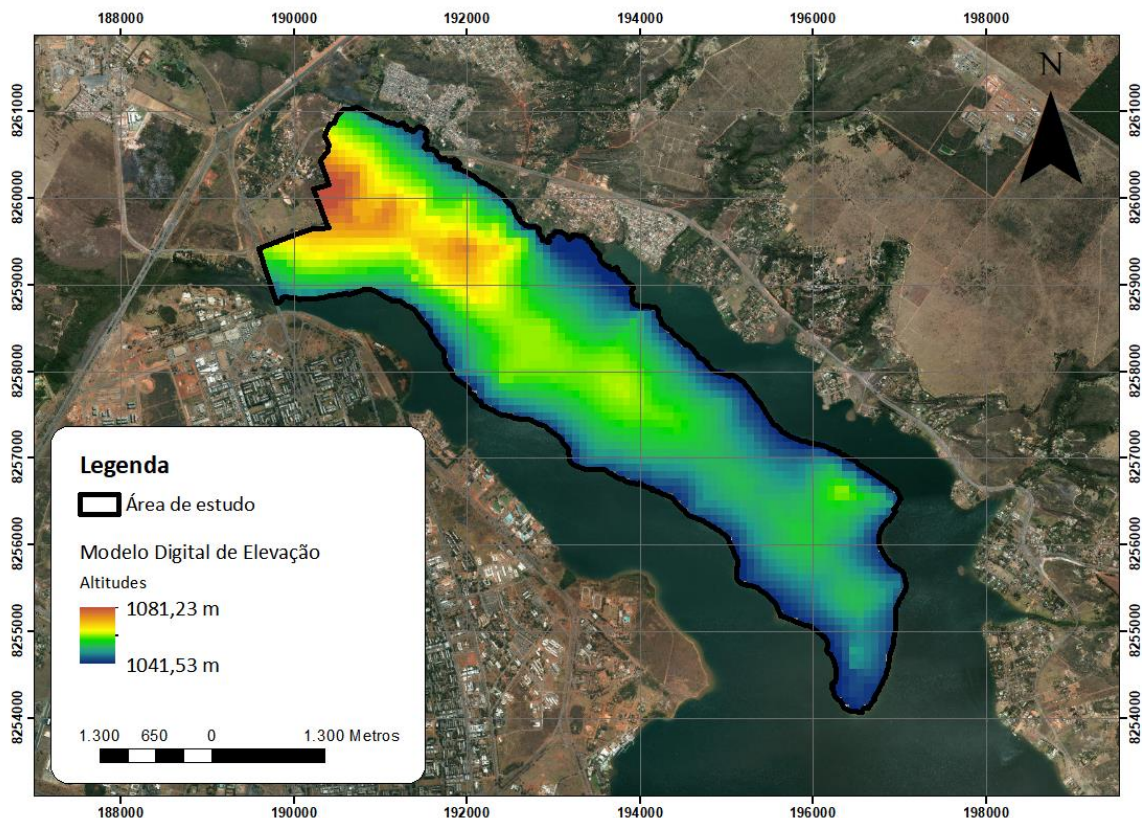


Figura 4.7 - Modelo digital de elevação da área de estudo do projeto.

4.2.2 Uso e ocupação do solo

As informações de uso e ocupação do solo servem para fornecer os parâmetros para o cálculo da infiltração da água no solo por meio do método do SCS.

Segundo a USDA (1986) esse método é aplicável em bacias urbanas de pequeno porte. A classificação do uso e ocupação do solo foi feita a partir da análise de imagens de satélite fornecidas pela Terracap.

A região é urbanizada, sendo que a bacia residencial tem uma ocupação já bem consolidada, enquanto que as outras áreas ainda possuem muitos lotes descobertos em desuso. As bacias CA1, CA2 e Residencial são caracterizadas pela predominância de áreas

loteadas. Já as bacias CA3 e CA4 possuem grandes áreas de campos abertos com grama ou mato, que ocupam a maioria da superfície das mesmas. A bacia Residencial é a que apresenta mais área vegetada, caracterizada principalmente por árvores em fundo de lotes e uma região não loteada que preserva vegetação de alta densidade. A Tabela 4.2 apresenta uma caracterização de cada uso de solo encontrado nas sub-bacias em percentual da ocupação.

Tabela 4.2 – Caracterização percentual de uso e ocupação do solo de cada sub-bacia.

Uso do solo	CA1	CA2	CA3	CA4	Residencial
Área vegetada	4,1%	1,4%	0,5%	2,8%	17,0%
Espaço aberto	13,2%	24,4%	40,1%	38,5%	21,1%
Solo exposto	6,0%	15,3%	3,1%	22,6%	2,0%
Lotes construídos	60,3%	33,1%	21,6%	14,8%	45,4%
Vias pavimentadas / estacionamento	16,4%	25,8%	34,7%	21,3%	14,5%

A Figura 4.8 mostra o mapa de uso do solo das suas regiões, a das sub-bacias do CA e da sub-bacia Residencial.

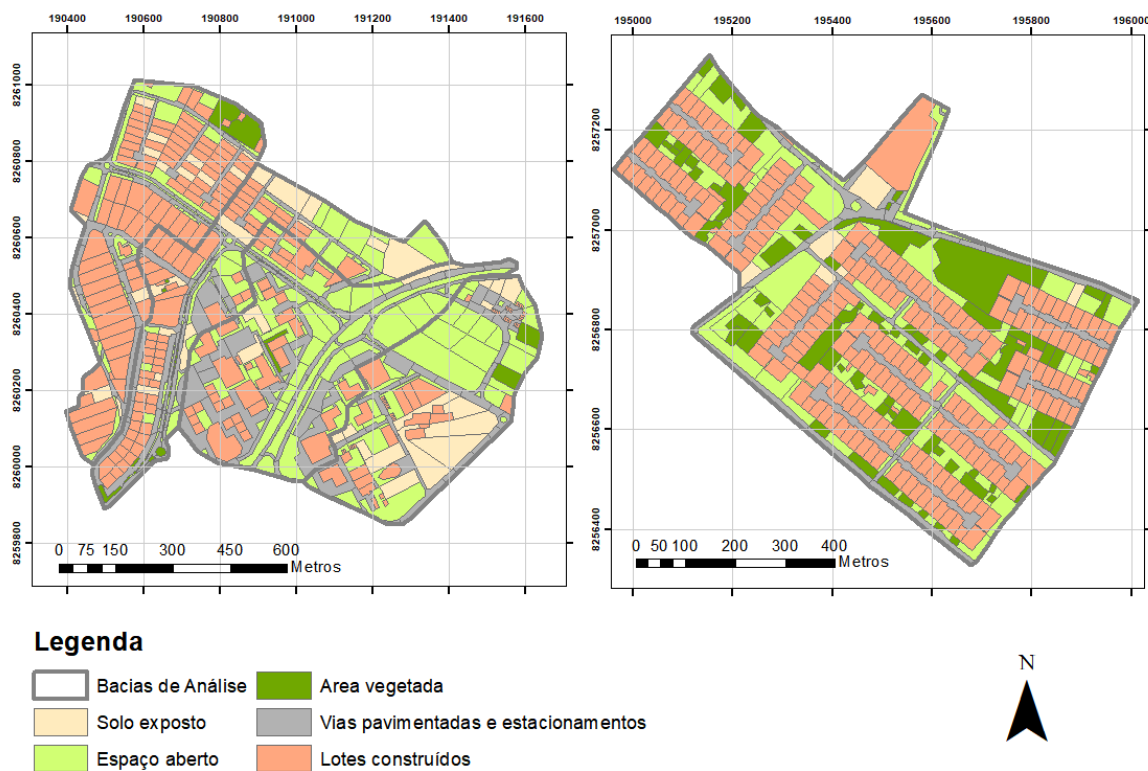


Figura 4.8 – Mapa de uso do solo das sub-bacias analisadas.

4.2.3 Determinação do CN

Para utilização no cálculo de infiltração pelo método da Curva-Número foi determinado o CN de cada uma das bacias. Esse parâmetro depende do tipo de solo, da condição de umidade antecedente e do uso e ocupação do solo. O solo da região foi classificado segundo tipo e condições de uso dentro do grupo hidrológico C. Os valores de CN adotados para cada uso do solo são relacionados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – CN adotado para cada uso de solo existente nas sub-bacias, de acordo com Tucci (1995).

Uso do solo	CN
Vegetação alta	62
Campo aberto (grama ou mato)	71
Solo exposto	77
Lotes construídos	90
Vias pavimentadas / estacionamento	98

A partir dos mapas de uso de solo e informação do CN, foi calculado o valor de CN médio para cada sub-bacia (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 – CN médio de cada sub-bacia.

Sub-bacias	CN médio
Bacia CA1	87
Bacia CA2	85
Bacia CA3	85
Bacia CA4	81
Bacia Residencial	82

4.2.4 Rede de drenagem

Os dados cadastrais da rede de drenagem instalada na área de estudo, para lançamento no SWMM são fornecidos pela Novacap. Foi feita uma triagem dos dados de forma a excluir da análise as regiões com mais inconsistências. As cinco sub-bacias analisadas compreendem as áreas de drenagem com mais dados disponíveis com confiabilidade. Ainda assim, foi necessário fazer ajustes na rede e correção de cotas de poços de visita em que não havia dados, utilizando as cotas altimétricas do terreno obtidas pelo Modelo Digital de Elevação. As redes possuem um total de 221 poços de visita. Outros parâmetros da rede estão relacionados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Parâmetros de caracterização da rede de drenagem nas sub-bacias de análise.

Sub-bacias	Área (ha)	Declividade média da bacia	Extensão da rede (km)	Densidade da rede (km/km ²)	Declividade média dos condutos
Bacia CA1	26,31	4,30%	1,96	7,46	3,92%
Bacia CA2	20,13	3,50%	1,98	9,82	3,71%
Bacia CA3	26,81	4,20%	2,39	8,92	3,79%
Bacia CA4	22,25	4,50%	1,54	6,91	6,62%
Bacia Residencial	46,75	1,90%	3,02	6,46	1,40%

É preciso destacar que para simulação da sub-bacia CA3 não foram fornecidos dados sobre a posição do lançamento, a rede estava incompleta. Sendo assim, a rede foi completada inserindo os 4 últimos poços de visita e o ponto do lançamento. A estimativa das posições foi feita com base no modelo digital de elevação. A Figura 4.9 mostra a rede de drenagem das sub-bacias estudadas.

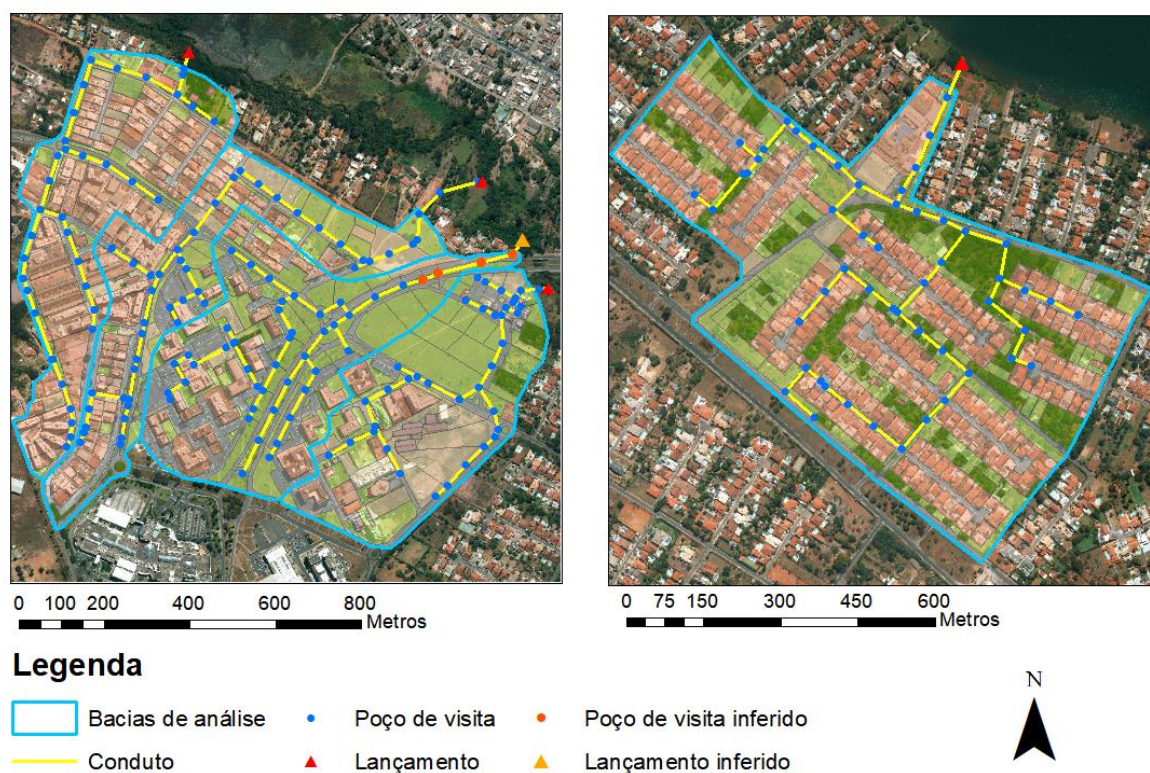


Figura 4.9 – Mapas da rede de drenagem das sub-bacias de análise.

Alguns outros parâmetros relacionados à rede foram adotados para realização da simulação. Em todos os cenários os condutos são circulares, com coeficiente de rugosidade de 0,015.

4.2.5 Chuva de Projeto

O PDDU-DF (GDF, 2009) apresenta uma curva Intensidade – Duração – Frequência (IDF) do Distrito Federal, mostrada na equação 4.3. Foi utilizada essa curva para determinação da chuva de projeto, utilizando tempos de retorno de 10 anos, conforme recomendação do PDDU, e de 1, 2 e 5 anos, de modo a avaliar comparativamente a eficiência das medidas compensatórias utilizadas.

$$I = \frac{1574,70 * T^{0,207}}{(t + 11)^{0,884}} \quad (\text{Equação 4.3})$$

Onde;

I = intensidade da chuva (mm/h);

T = tempo de retorno em anos;

t = tempo de duração da chuva (min).

O tempo de retorno é interpretado como o número médio de anos no qual se espera que a precipitação seja igualada ou superada uma vez, ou seja, permite inferir qual o risco de ocorrer um certo evento em um período definido. A curva IDF permite correlacionar as intensidades e durações de chuva, de forma que quanto maior a intensidade, menor será o tempo de duração e a probabilidade de ocorrência do evento.

O hietograma de projeto é caracterizado pela distribuição temporal da lâmina precipitada. Para estimativa do hietograma de projeto da chuva dada pela curva IDF (equação 4.3) foi utilizado o método dos Blocos Alternados, com uma duração de chuva de 24 horas discretizada em intervalos de 5 minutos. A Tabela 4.6 relaciona os valores totais de lâmina precipitada das diferentes chuvas de projeto utilizadas.

Tabela 4.6 – Lâmina precipitada em cada chuva simulada.

Tempo de retorno	Lâmina total precipitada (mm)
10 anos	97,6
5 anos	84,6
2 anos	70,0
1 ano	60,6

4.3 SIMULAÇÕES HIDROLÓGICAS-HIDRÁULICAS

A modelagem hidrológica-hidráulica foi feita utilizando o modelo SWMM na versão PCSWMM, disponibilizada gratuitamente pela CHI Water (Computational Hydraulics International Water) para realização de trabalhos acadêmicos. Essa versão possui integração com um Sistema de Informações Geográficas e uma interface mais acessível, que facilitam entrada de dados e a visualização dos resultados.

A simulação foi feita utilizando o modelo Chuva-vazão e Fluxo, para a infiltração foi utilizado o método do SCS e para o transporte foi utilizado o método da onda dinâmica.

4.3.1 Comparação da modelagem

A realização do projeto não contou com a realização de calibragem do modelo antes da simulação. Porém, como uma forma de verificação dos resultados foi feito o cálculo da vazão da sub-bacia Residencial pelo Método Racional. Esse método se aplica bem às bacias com áreas pequenas, servindo para calcular a vazão de pico e comparar com a vazão de pico resultante da simulação no software PCSWMM.

A vazão de pico, no método racional, é calculada segundo a Equação 4.4.

$$Q = \frac{C * i * A}{360} \quad (\text{Equação 4.4})$$

Onde:

Q = vazão de pico (m³/s);

C = coeficiente de escoamento superficial da bacia (adimensional);

i = intensidade da chuva (mm/h);

A = área de drenagem (km²).

A intensidade da chuva foi estimada através da curva IDF do PDDU (equação 4.3) utilizando um tempo de concentração (t_c) calculado pela equação de Kirpich (equação 4.5).

$$t_c = 3,98 \frac{L^{0,77}}{I^{0,395}} \quad (\text{Equação 4.5})$$

Onde:

t_c = tempo de concentração (min);

L = extensão longitudinal do escoamento da bacia (km);

I = declividade média da bacia (m/m).

Para ao cálculo do coeficiente de escoamento foi feita uma média ponderada da área utilizando dos coeficientes para cada uso do solo presente na bacia, conforme os valores apresentados por Canholi (2014), relacionados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Valores de referência de coeficiente de escoamento superficial (C) para os usos do solo da bacia analisada.

Uso do solo	Coeficiente de escoamento
Área vegetada	0,1
Espaço aberto	0,25
Solo exposto	0,3
Lotes construídos	0,45
Vias pavimentadas / estacionamento	0,85

4.3.2 Cenários de simulação

A simulação para geração de resultados foi feita em um cenário base, que consiste da situação atual de rede de drenagem implementada, e comparado a outros cenários projetados, implementando técnicas sustentáveis de drenagem como medida compensatória, conforme descrito na Tabela 4.8.

No cenário 1 foram utilizadas trincheiras de infiltração distribuídas nas sub-bacias e, no cenário 2, pavimentos permeáveis no lugar de pavimento asfaltado em parte das vias e estacionamentos. Os cenários 1.1, 1.2 e 2.1 consistem em alternativas concebidas apenas para a sub-bacia Residencial de forma a obter um melhor desempenho e fornecer novas hipóteses. Essa sub-bacia apresentou mais pontos de extravasamento do que as sub-bacias do CA, além de possuir extensa área verde, dando a possibilidade da utilização de valas de infiltração como alternativa de intervenção de baixo impacto.

Tabela 4.8 – Descrição dos cenários de simulação.

	Rede tradicional implementada	Trincheiras de infiltração	Pavimentos permeáveis	Valas de infiltração
Cenário base	●			
Cenário 1	●	●		
Cenário 1.1*	●	●		
Cenário 1.2	●	●		●
Cenário 2	●		●	
Cenário 2.1	●		●	●

* Cenário com os mesmos dispositivos que o cenário 1, porém utilizando trincheiras com dimensões maiores.

Tanto as trincheiras de infiltração quanto os pavimentos permeáveis foram alocados ao longo das vias de trânsito pavimentadas locais ou coletoras, caracterizadas pelo trânsito em velocidades mais baixas e voltadas para o acesso local, e também nos estacionamentos abertos. No caso das trincheiras, essas seriam posicionadas nas laterais das vias, dimensionadas com uma largura fixa de 1 metro, conforme indicação do Manual de Drenagem da Adasa (2018).

A modelagem das LIDs no software PCSWMM é feita por meio da simulação uma composição de camadas, para as quais são atribuídos os parâmetros como coeficiente de rugosidade, taxa de infiltração, profundidade, entre outros. A Tabela 4.9 relaciona as possíveis camadas associadas aos três tipos de LIDs utilizados.

Tabela 4.9 – Camadas utilizadas para modelar LIDs no PCSWMM (Adaptado de CHI Water, 2018).

Tipo de LID	Superfície	Pavimento	Solo	Armazenamento	Dreno
Trincheira de infiltração	●			●	○
Pavimento permeável	●	●	○	●	
Vala de infiltração	●				

Legenda:

● - obrigatório

○ - opcional

Nas trincheiras de infiltração não foi utilizado dreno e os pavimentos permeáveis não contaram com uma camada de solo, camadas opcionais para esses tipos de LIDs. A seguir, nas tabelas 4.10, 4.11 e 4.12 serão detalhadas as camadas utilizadas para cada LID no presente trabalho.

A Figura 4.10 ilustra esquematicamente quais camadas compõem as trincheiras de infiltração. O coeficiente de Manning adotado para a cobertura de superfície segue valor indicado pela Chi Water (2018) para superfície gramada. Para condutividade hidráulica, tomou-se o valor médio verificado por Lima *et al.* (2013) para condutividade de Cambissolo na profundidade de 1 metro.

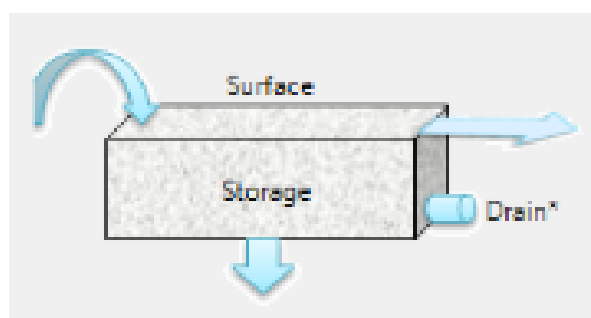


Figura 4.10 – Esquema ilustrativo das camadas das trincheiras de infiltração (Chi Water, 2018).

Tabela 4.10 – Parâmetros e dimensões utilizados para modelagem das trincheiras de infiltração.

Camada	Parâmetro	Valor utilizado
Superfície	Altura de borda	0
	Fração vegetada	0

Armazenamento	Coeficiente de rugosidade (Manning)	0,041
	Declividade	0
	Altura	1 m
	Índice de vazios	0,5
	Condutividade hidráulica	262,52 mm/h
	Fator de entupimento	0

Os pavimentos permeáveis foram caracterizados por três camadas, ilustradas na Figura 4.11. Na camada superficial foi considerado o coeficiente de rugosidade igual ao do concreto. O pavimento possui a permeabilidade mínima estabelecida pela NBR 16416. Para condutividade hidráulica, utilizou-se como base o mesmo parâmetro que o das trincheiras de infiltração, porém considerando um fator (10^{-2}) de perda de condutividade devido à compactação do solo e à diminuição da área de contato para infiltração comparado às trincheiras.

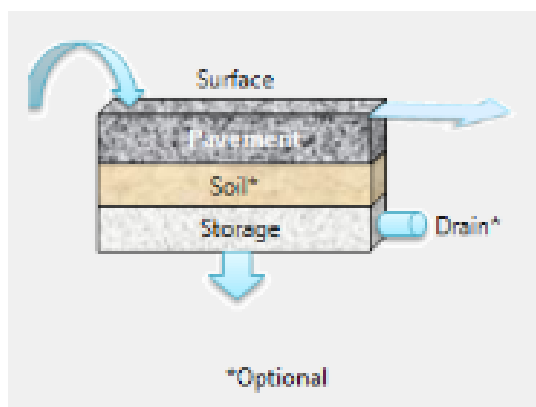


Figura 4.11 – Esquema ilustrativo das camadas dos pavimentos permeáveis (Chi Water, 2018).

Tabela 4.11 – Parâmetros e dimensões utilizados para modelagem dos pavimentos permeáveis.

Camada	Parâmetro	Valor utilizado
Superfície	Altura de borda	0
	Fração vegetada	0
	Coeficiente de rugosidade (Manning)	0,012
	Declividade	1%
Pavimento	Espessura	150 mm
	Índice de vazios	0,21

	Permeabilidade do pavimento	3660 mm/h
	Fator de entupimento	0
Armazenamento	Altura	350 mm
	Índice de vazios	0,75
	Condutividade hidráulica	2,6252 mm/h
	Fator de entupimento	0

Para as valas de infiltração, ilustradas na Figura 4.12, a única camada a se caracterizar é a superficial. O coeficiente de rugosidade adotado considerou, assim como nas trincheiras de infiltração, o valor fornecido pela Chi Water (2018) para área gramada.

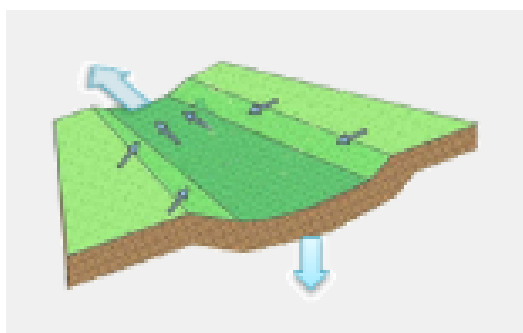


Figura 4.12 – Esquema ilustrativo das valas de infiltração (Chi Water, 2018).

Tabela 4.12 – Parâmetros e dimensões utilizados para modelagem das valas de infiltração.

Camada	Parâmetro	Valor utilizado
Superfície	Altura de borda	1000
	Fração vegetada	0
	Coeficiente de rugosidade (Manning)	0,041
	Inclinação	1%
	Fator de inclinação da borda	5

Considerou-se para todos os LIDs uma situação de solo com saturação igual a 0 no início da simulação.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 COMPARAÇÃO DA MODELAGEM

A comparação da modelagem foi feita tomando como base a sub-bacia Residencial. A Tabela 5.1 relaciona os usos do solo com seu respectivo coeficiente de escoamento e percentual de ocupação nessa bacia. Esses parâmetros levam a um coeficiente de escoamento médio de 0,4 para a bacia. A Tabela 5.2 mostra os resultados do cálculo de vazão de pico para a sub-bacia Residencial utilizando o método racional, para a qual foi calculado um tempo de concentração de 25 minutos.

Tabela 5.1 – Coeficientes de escoamento dos usos de solo das sub-bacias do projeto.

Uso do solo	Coeficiente de escoamento	Ocupação na bacia Residencial
Área vegetada	0,1	17,0%
Espaço aberto	0,25	21,1%
Solo exposto	0,3	2,0%
Lotes construídos	0,45	45,4%
Vias pavimentadas / estacionamento	0,85	14,5%

Tabela 5.2 – Vazão de pico da sub-bacia Residencial calculada pelo método racional.

Sub-bacia Residencial	
Área (ha)	46,75
Maior extensão de drenagem (km)	1,41
Coeficiente de escoamento	0,4
Tempo de Concentração (min)	25
Intensidade da chuva com TR de 10 anos (mm/h)	107,11
Vazão de pico (m³/s)	5,61

O gráfico mostrado na Figura 5.1 apresenta o resultado da simulação no PCSWMM para a mesma chuva, dividida em blocos iguais de 5 minutos. Verifica-se que a vazão de pico simulada resultante foi de 4,12 m³/s, apresentando um erro de 27% com relação à vazão calculada pelo método racional. Existem alguns fatores intervenientes na simulação que podem acarretar tal erro. A simulação considera uma situação de solo não saturado no início da chuva, o que pode fazer com que um volume muito grande seja infiltrado para uma chuva de apenas 25 minutos, atenuando o escoamento superficial.

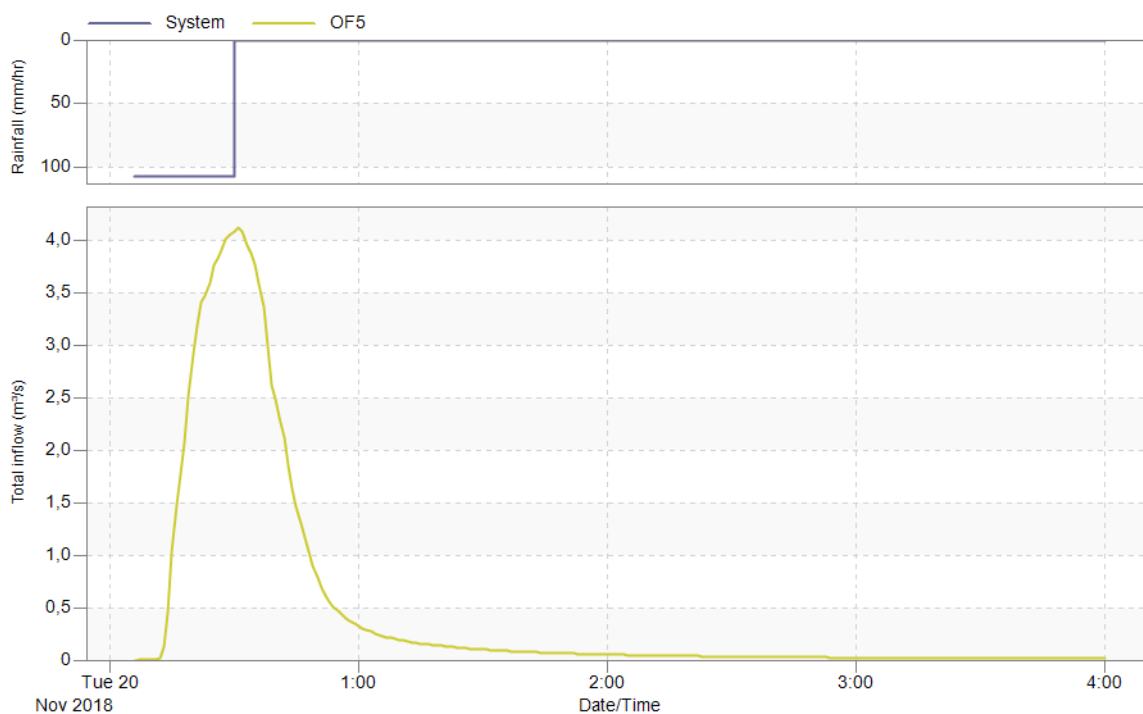


Figura 5.1 – Hidrograma de escoamento resultante da chuva com intensidade de 107,11 mm/h, tempo de retorno de 10 anos e duração de 25 minutos dado pela simulação no PCSWMM.

5.2 ANÁLISE DA SUB-BACIA RESIDENCIAL

Simulando a chuva de TR de 1 ano, no cenário de base a sub-bacia Residencial a água extravasou em 47% dos poços de visita (PVs), com um volume total extravasado de 1.061 m³. Já para a chuva de 10 anos de tempo de retorno, 55% dos PVs tiveram extravasamento, com volume mais expressivo, 6.191 m³. As figuras 5.2 e 5.3 permitem observar quais poços extravasaram em cada faixa de volume, para TR igual 1 e 10 anos respectivamente.



Figura 5.2 – Mapa da sub-bacia Residencial com destaque para os poços de visita, indicando aqueles nos quais houve mais extravasamento para TR = 1 ano no cenário base.



Figura 5.3 – Mapa da sub-bacia Residencial com destaque para os poços de visita, indicando aqueles nos quais houve mais extravasamento para TR = 10 anos no cenário base.

A inserção dos LIDs para construção dos cenários 1 e 2 foi feita sobre as áreas pavimentadas da sub-bacia, que cobrem 4,43% de toda área analisada e recebem toda vazão dos lotes construídos. Na Figura 5.4 são destacadas as regiões nas quais elas foram inseridas, porém não necessariamente as LIDs ocupam toda esta área. No caso das trincheiras, as mesmas foram dimensionadas com 15 metros de comprimento e 1 metro de largura, sendo posicionadas à frente de cada lote, de modo que ocupam apenas cerca de 11% da área de cada rua onde estão posicionadas. Já os pavimentos permeáveis ocupam toda a área destacada.



Figura 5.4 – Mapa com alocação dos LIDs nos cenários 1 e 2.

Analisando a sub-bacia Residencial no evento da chuva de projeto de 1 ano de tempo de retorno, observa-se uma vazão de pico de $3,891 \text{ m}^3/\text{s}$ no cenário base, que foi reduzida em apenas 3,4% no cenário 1 e em até 59,3% com a utilização de pavimentos permeáveis no cenário 2. A Figura 5.5 apresenta a comparação entre as vazões no exutório da sub-bacia para o cenário de base e os dois cenários de comparação. O potencial de redução de vazão de pico com a utilização das LIDs foi pequeno quando comparado ao simulado por Fileni (2017) para sub-bacias na região administrativa de Ceilândia/DF. Isso ocorre devido ao grau de impermeabilização do terreno, dado que a sub-bacia possui uma área verde (espaço aberto com grama ou mato e áreas vegetadas) de cerca de 28%, que é bem maior do que o da região de Ceilândia, caracteristicamente altamente impermeabilizada.

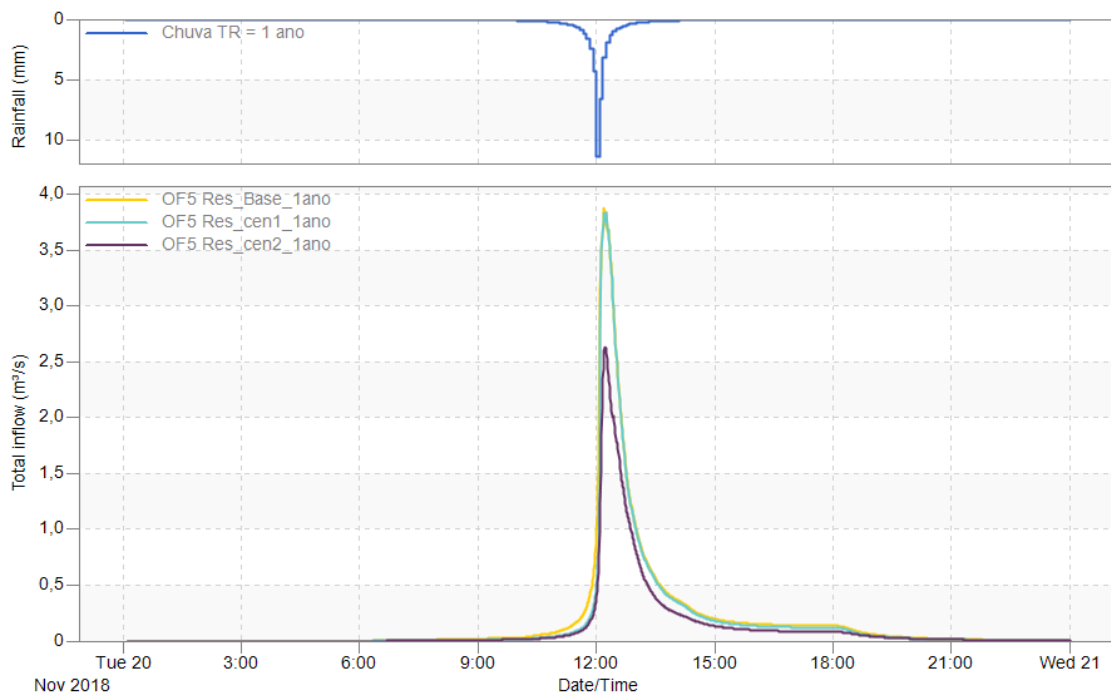


Figura 5.5 – Hidrograma da chuva de projeto de TR=1 e vazão no exutório da sub-bacia Residencial no cenário base, cenário 1 e cenário 2.

Observa-se que o maior volume de escoamento da sub-bacia é gerado pelos lotes construídos, que tem sua vazão direcionada para as ruas. Por esse motivo, procurou-se alocar as LIDs nas ruas e calçadas, considerando que a sua implementação em áreas verdes teria um custo benefício ruim. A forma como as trincheiras de infiltração foram dimensionadas para o cenário 1 levou em conta principalmente a disponibilidade de espaço e direção do escoamento. Estas ocupam uma área superficial de 15m² (15m de comprimento e 1m de largura). Sendo assim, as mesmas podem ser posicionadas na frente dos lotes ocupando uma área de calçada e uma parte da rua. Nota-se que esses dispositivos lineares não têm a mesma facilidade de distribuição espacial que os pavimentos permeáveis, de forma que elas ocuparam apenas 0,5% da área superficial total da sub-bacia nesse cenário. Devido à dificuldade de alocação das trincheiras nas ruas, percebe-se um desempenho muito inferior do cenário 1.

Observando-se o desempenho inferior das trincheiras de infiltração do cenário 1, foi feito um cenário 1.1 utilizando trincheiras de tamanho maior, com 50m² cada, de modo a ocupar entre 30 e 40% da área de rua e calçada. Ao tomar essa proporção, as trincheiras de infiltração se mostraram o cenário com maior redução de volume escoado e maior redução de vazão de pico (Figura 5.6). Esse cenário 1.1 foi desenhado apenas como medida

comparativa para averiguar o motivo de o cenário 1 ter tido um desempenho tão inferior ao 2.

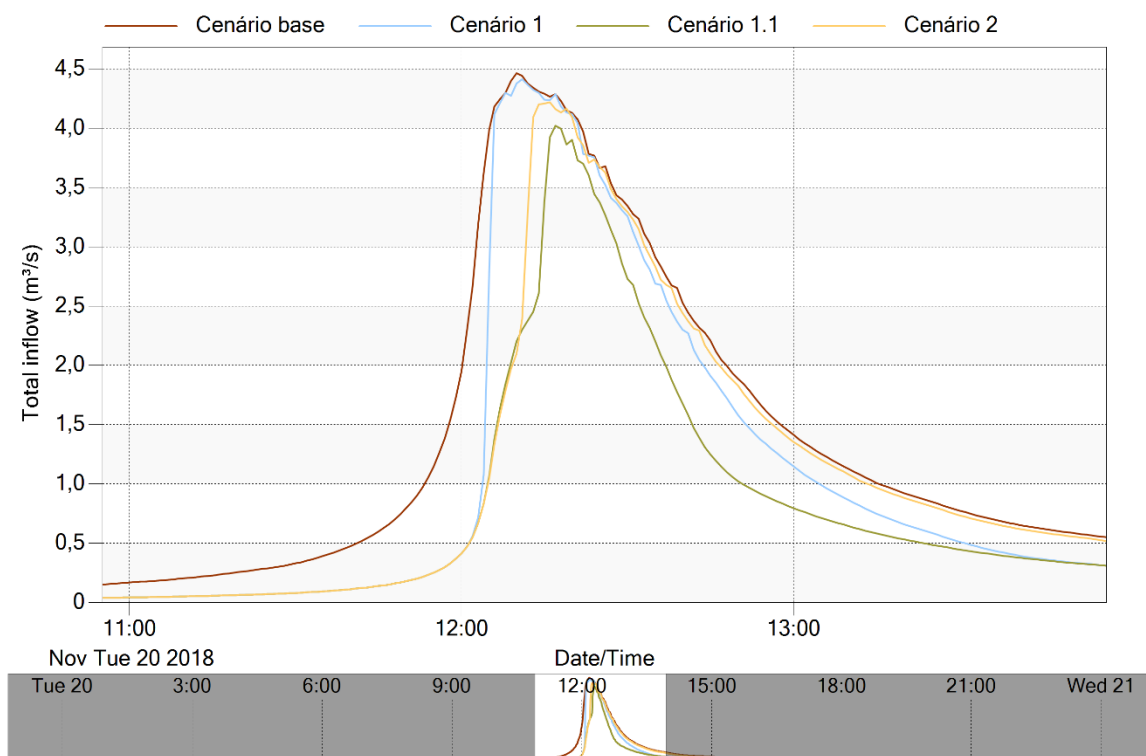


Figura 5.6 – Vazão no exutório da sub-bacia Residencial para a chuva de projeto de TR = 5 anos nos cenários base, 1, 1.1, e 2.

A Tabela 5.3 mostra uma comparação da área total ocupada por cada tipo de LID nos cenários 1, 1.1 e 2, bem como os volumes de armazenamento das LIDs em cada um dos cenários. O volume útil de armazenamento é considerado como o volume de vazios total de todas as LIDs do cenário. Nota-se que o volume de armazenamento dos pavimentos permeáveis é mais de quatro vezes maior que o volume de trincheiras no cenário 1, fato que contribui para o comportamento inferior desse cenário. No entanto, as trincheiras do cenário 2 tem armazenamento menor que os pavimentos e ainda assim desempenham mais satisfatoriamente. Isso indica que as trincheiras apresentam maior capacidade de infiltração da água, uma vez que possuem uma área lateral de contato com o solo maior.

Tabela 5.3 – Análise da área superficial ocupada e volume de armazenamento de LIDs na sub-bacia Residencial nos cenários 1, 1.1 e 2.

Sub-bacia Residencial		
Tipo de LID	% da bacia ocupado pela LID	Volume útil de armazenamento (m³)
Pavimentos permeáveis (cenário 2)	4,43%	8880,10
Trincheiras de infiltração de 15m² cada (cenário 1)	0,49%	1867,5
Trincheiras de infiltração de 50m² cada (cenário 1.1)	1,62%	6190

A capacidade de redução da vazão de pico diminui à medida que o tempo de retorno aumenta, sendo que para TR igual a 10 anos os LIDs não demonstram efeito sobre esse parâmetro. Por outro lado, em todos os cenários os LIDs contribuíram para a diminuição do volume de saída da bacia e do volume total extravasado nos poços de visita, conforme mostrado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Resultados da simulação para as chuvas de tempos de retorno igual a 1, 2, 5 e 10 anos, para os parâmetros: vazão de pico no exutório; volume total escoado no exutório; volume de água extravasada nos poços de visita com extravasamento.

		Vazão de pico (m³/s)	Redução na vazão de pico (%)	Volume exutório (m³)	Redução do volume no exutório (%)	Volume de extravasamento (m³)	Redução do volume de extravasamento (%)
TR=1	Cenário base	3,891	-	14720	-	1061	-
	Cenário 1	3,759	3,4%	9742	33,8%	616	41,9%
	Cenário 1.1	1,274	67,3%	6023	59,1%	0	100,0%
	Cenário 2	1,584	59,3%	8760	40,5%	0	100,0%
TR=2	Cenário base	4,122	-	17600	-	2037	-
	Cenário 1	4,111	0,3%	12020	31,7%	1514	25,7%
	Cenário 1.1	1,892	54,1%	8135	53,8%	0	100,0%
	Cenário 2	3,259	20,9%	12430	29,4%	27	98,7%
TR=5	Cenário base	4,465	-	21940	-	4060	-
	Cenário 1	4,415	1,1%	15270	30,4%	3526	13,2%
	Cenário 1.1	4,023	9,9%	12340	43,8%	600	85,2%
	Cenário 2	4,22	5,5%	16970	22,7%	1587	60,9%
TR=10	Cenário base	4,579	-	25120	-	6191	-
	Cenário 1	4,579	0,0%	17760	29,3%	5646	8,8%
	Cenário 1.1	4,385	4,2%	14970	40,4%	2176	64,9%
	Cenário 2	4,579	0,0%	19830	21,1%	3826	38,2%

Nota-se que até os eventos com tempo de retorno de 2 anos a utilização de LIDs consegue eliminar a ocorrência de extravasamento na rede de drenagem. Em todos os cenários e

tempos de retorno, esse é o parâmetro sobre o qual as LIDs demonstram maior influência, tendo efeito inclusive nos eventos de 10 anos de tempo de retorno.

Os cenários 1.2 e 2.1 foram feitos utilizando as áreas verdes da sub-bacia como valas de infiltração, com o objetivo de complementar os cenários com trincheiras e com pavimentos permeáveis de modo mais realista. Nesse caso, as valas ocupam toda a região destacada na Figura 5.7.



Figura 5.7 – Mapa com alocação das valas de infiltração.

Até nos cenários com chuva de projeto de 5 anos de tempo de retorno as LIDs combinadas mostraram grande eficiência em redução da vazão de água extravasada, como se pode observar na Figura 5.8. O gráfico mostrado é um recorte do momento de maior pico da chuva, que acontece por volta de 12h.

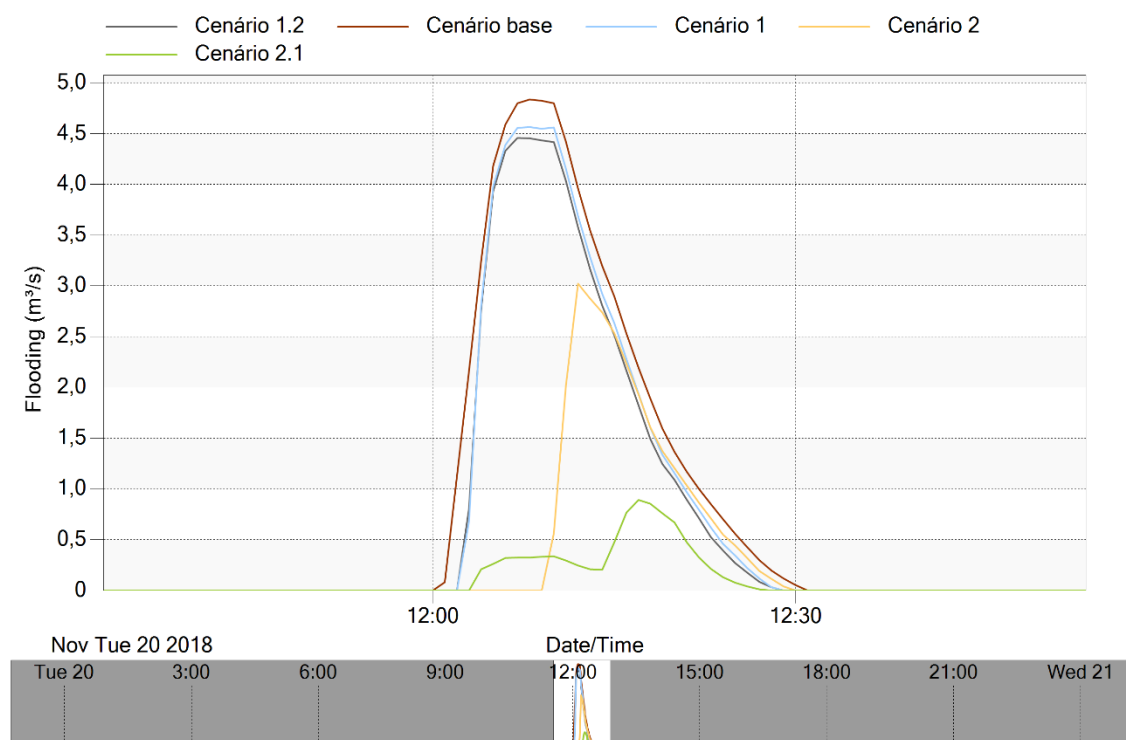


Figura 5.8 – Gráfico da vazão de água extravasada no momento de pico da chuva com tempo de retorno de 5 anos.

No entanto, observa-se que para a chuva de tempo de retorno igual a 10 anos nenhum dos cenários foi suficiente para atingir a vazão específica de 24,4 L/s/ha estabelecida pela Resolução nº 9/2011 da Adasa (2011). No cenário 2.1, o mais eficaz em termos de redução de vazão de pico, essa vazão específica chega a 89 L/s/ha, ainda muito aquém do exigido pela legislação, como é possível observar na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Vazão específica simulada para cada cenário na sub-bacia Residencial.

		Vazão específica no exutório (L/s/ha)
TR=10	Cenário base	94
	Cenário 1	94
	Cenário 1.1	90
	Cenário 2	94
	Cenário 1.2	94
	Cenário 2.1	89

Zanandrea e Silveira (2018) analisaram a vazão de pico e o volume escoado por uma bacia localizada na região metropolitana de Porto Alegre/RS, em um evento de chuva com tempo de retorno igual a 10 anos (precipitação de 64,4 mm em um período de um dia). Nesse

trabalho foi projetado um cenário futuro com pavimentos permeáveis e valas de infiltração e um sem, observando-se uma redução da vazão de pico em 10,5% e redução do volume em 13,8% com a utilização das LIDs. As intervenções foram idealizadas de acordo com o espaço disponível, sendo que ao todo as valas de infiltração ocupariam 3% da área total da bacia e os pavimentos permeáveis, 1%.

5.3 ANÁLISE DAS SUB-BACIAS DO CA

A simulação da rede de drenagem implementada no CA mostrou um desempenho bem melhor, começando a apresentar pontos de extravasamento apenas para a chuva de projeto de 5 anos. No pior cenário, chuva de projeto com tempo de retorno igual a 10 anos, a rede teve 15 poços de visita extravasados, 9% do total, mostrados na Figura 5.9.



Figura 5.9 – Mapa das sub-bacias do CA com destaque para pontos com extravasamento na chuva de tempo de retorno de 10 anos no cenário base.

No entanto, a vazão específica verificada no exutório das sub-bacias (Tabela 5.6) para a chuva de tempo de retorno igual a 10 anos é alta quando comparada à vazão de 24,4 L/s/ha determinada pela Resolução 09/2011 da Adasa (2011).

Tabela 5.6 – Vazão específica calculada para os exutórios das sub-bacias do CA.

		Vazão específica no exutório (L/s/ha)
CA 1	Cenário base	224
CA 2	Cenário base	202
CA 3	Cenário base	172
CA 4	Cenário base	155

Assim como na sub-bacia Residencial, nas sub-bacias do CA as trincheiras de infiltração e pavimentos permeáveis foram colocados em vias de fluxo menos intenso e nos estacionamentos, conforme mostrado na Figura 5.10. As trincheiras de infiltração não ocupam toda a área destacada, sendo posicionadas longitudinalmente nas laterais das vias ou dos estacionamentos sempre com 1 metro de largura.

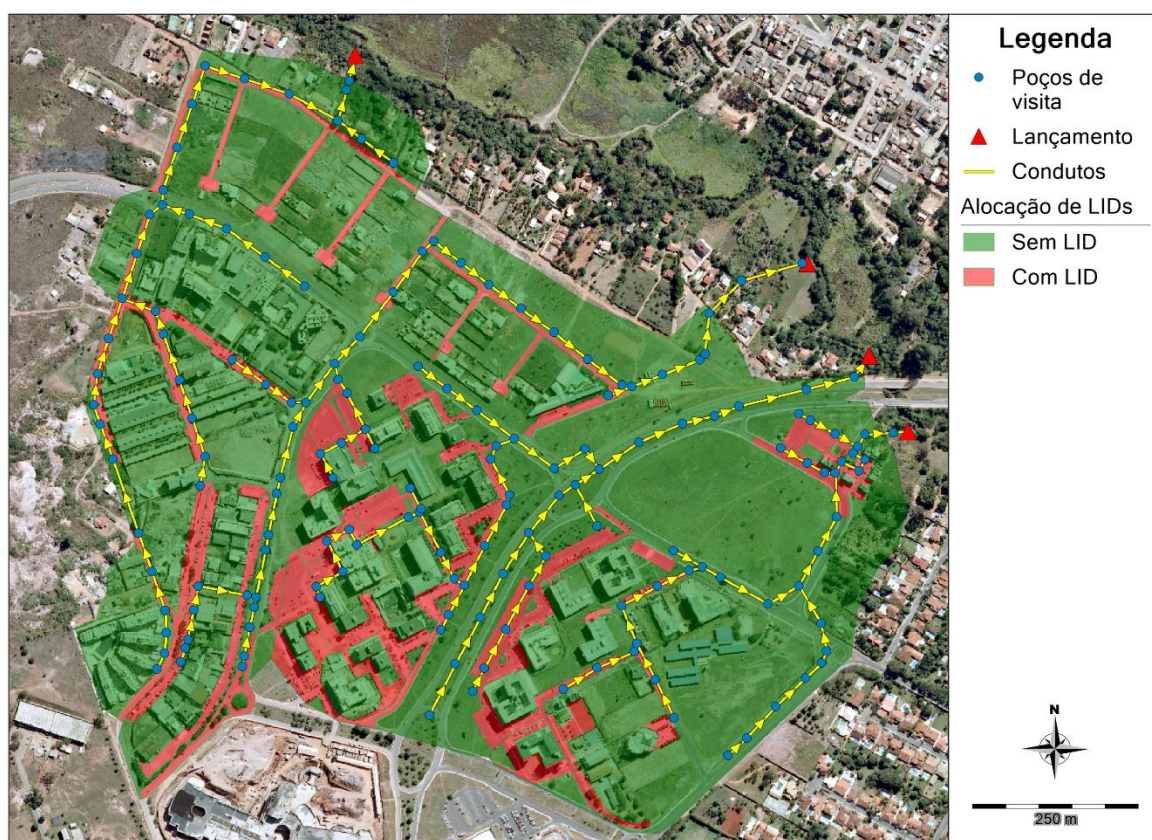


Figura 5.10 – Mapa com alocação das LIDs nas sub-bacias do CA.

A Tabela 5.7 permite comparar o percentual da área superficial da sub-bacia ocupada por LIDs em cada cenário, bem como o volume de armazenamento das LIDs. Os pavimentos permeáveis possuem área e volume muito maior que as trincheiras de infiltração. Assim, é possível notar o desempenho superior do cenário 2.

Tabela 5.7 – Análise da área superficial ocupada e volume de armazenamento de cada tipo de LID.

Sub-bacias CA		
Tipo de LID	Área ocupada por LIDs	Volume útil de armazenamento (m³)
Trincheiras de infiltração (cenário 1)	0,75%	4.359,5
Pavimentos permeáveis (cenário 2)	13,63%	41.488,89

Com a inserção das LIDs observou-se uma diminuição da vazão específica gerada, como mostra a Tabela 5.8, porém ainda não foi possível alcançar o limite de 24,4 L/s/ha.

Tabela 5.8 - Vazão específica nos exutórios das sub-bacias do CA para cada cenário simulado.

		Vazão específica no exutório (L/s/ha)
CA 1	Cenário base	224
	Cenário 1	212
	Cenário 2	141
CA 2	Cenário base	202
	Cenário 1	185
	Cenário 2	109
CA 3	Cenário base	172
	Cenário 1	168
	Cenário 2	64
CA 4	Cenário base	155
	Cenário 1	144
	Cenário 2	87

A utilização das LIDs promoveu uma redução do volume de água extravasado, chegando a eliminar esse volume totalmente no cenário 2 para uma chuva de tempo de retorno igual a 10 anos, como mostra a Figura 5.11.

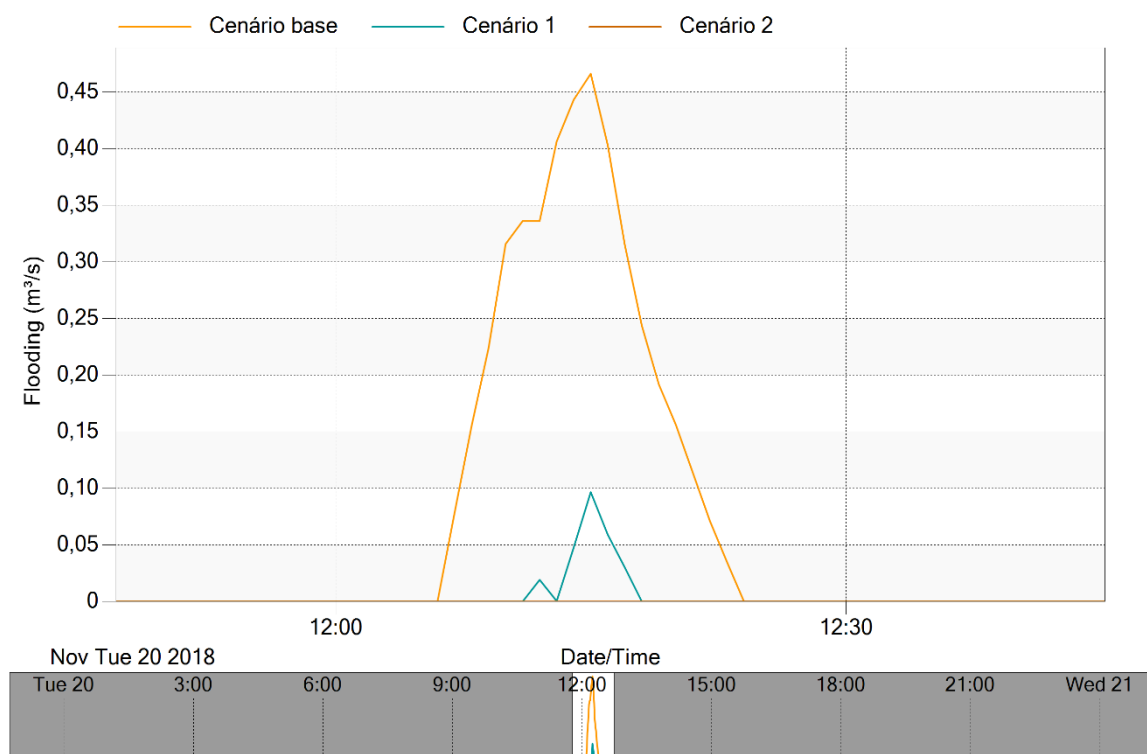


Figura 5.11 – Gráfico da vazão de extravasamento para os três cenários em uma chuva com tempo de retorno igual a 10 anos.

A Tabela 5.9 mostra uma análise do percentual de redução de volume extravasado nas sub-bacias do CA nas chuvas com tempo de retorno de 5 e 10 anos, uma vez que nas chuvas de 1 e 2 anos não houve poços de visita extravasados.

Tabela 5.9 – Análise da redução do volume extravasado na área das sub-bacias do CA com utilização das LIDs.

		Volume de extravasamento (m³)	Redução do volume de extravasamento (%)
TR=5	Cenário base	65	-
	Cenário 1	0	100,0%
	Cenário 2	0	100,0%
TR=10	Cenário base	257	-
	Cenário 1	14	94,6%
	Cenário 2	0	100,0%

As tabelas 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13 apresentam uma análise dos parâmetros vazão de pico e volume total escoado pelo exutório das sub-bacias 1, 2, 3 e 4 do CA respectivamente.

Tabela 5.10 – Resultados da simulação no exutório da sub-bacia CA 1 para as chuvas de tempos de retorno igual a 1, 2, 5 e 10 anos, para os parâmetros: vazão de pico no exutório; volume total escoado no exutório.

		Vazão de pico (m³/s)	Redução na vazão de pico (%)	Volume exutório (m³)	Redução do volume no exutório (%)
TR=1	Cenário base	2,368	-	8512	-
	Cenário 1	1,634	31,0%	4061	52,3%
	Cenário 2	0,6964	70,6%	3763	55,8%
TR=2	Cenário base	3,051	-	10480	-
	Cenário 1	2,326	23,8%	5513	47,4%
	Cenário 2	1,243	59,3%	5393	48,5%
TR=5	Cenário base	4,213	-	13810	-
	Cenário 1	3,748	11,0%	7963	42,3%
	Cenário 2	2,266	46,2%	8394	39,2%
TR=10	Cenário base	5,172	-	16460	-
	Cenário 1	4,871	5,8%	10120	38,5%
	Cenário 2	3,358	35,1%	10970	33,4%

Tabela 5.11 – Resultados da simulação no exutório da sub-bacia CA 2 para as chuvas de tempos de retorno igual a 1, 2, 5 e 10 anos, para os parâmetros: vazão de pico no exutório; volume total escoado no exutório.

		Vazão de pico (m³/s)	Redução na vazão de pico (%)	Volume exutório (m³)	Redução do volume no exutório (%)
TR=1	Cenário base	2,127	-	7462	-
	Cenário 1	1,14	46,4%	3202	57,1%
	Cenário 2	0,5456	74,3%	2893	61,2%
TR=2	Cenário base	2,708	-	9225	-
	Cenário 1	1,743	35,6%	4451	51,8%
	Cenário 2	0,7593	72,0%	4029	56,3%
TR=5	Cenário base	3,619	-	12070	-
	Cenário 1	2,897	20,0%	6582	45,5%
	Cenário 2	1,417	60,8%	6037	50,0%
TR=10	Cenário base	4,263	-	14310	-
	Cenário 1	3,915	8,2%	8464	40,9%
	Cenário 2	2,22	47,9%	7866	45,0%

Tabela 5.12 – Resultados da simulação no exutório da sub-bacia CA 3 para as chuvas de tempos de retorno igual a 1, 2, 5 e 10 anos, para os parâmetros: vazão de pico no exutório; volume total escoado no exutório.

		Vazão de pico (m³/s)	Redução na vazão de pico (%)	Volume exutório (m³)	Redução do volume no exutório (%)
TR=1	Cenário base	2,095	-	9230	-
	Cenário 1	1,454	30,6%	4763	48,4%
	Cenário 2	0,7531	64,1%	3192	65,4%
TR=2	Cenário base	2,636	-	11360	-
	Cenário 1	2,018	23,4%	6396	43,7%
	Cenário 2	0,956	63,7%	4087	64,0%
TR=5	Cenário base	3,572	-	14860	-
	Cenário 1	3,25	9,0%	9117	38,6%
	Cenário 2	1,31	63,3%	5860	60,6%
TR=10	Cenário base	4,471	-	17770	-
	Cenário 1	4,35	2,7%	11530	35,1%
	Cenário 2	1,653	63,0%	7593	57,3%

Tabela 5.13 – Resultados da simulação no exutório da sub-bacia CA 4 para as chuvas de tempos de retorno igual a 1, 2, 5 e 10 anos, para os parâmetros: vazão de pico no exutório; volume total escoado no exutório.

		Vazão de pico (m³/s)	Redução na vazão de pico (%)	Volume exutório (m³)	Redução do volume no exutório (%)
TR=1	Cenário base	1,415	-	6737	-
	Cenário 1	0,9949	29,7%	4067	39,6%
	Cenário 2	0,8122	42,6%	3841	43,0%
TR=2	Cenário base	1,901	-	8511	-
	Cenário 1	1,434	24,6%	5408	36,5%
	Cenário 2	0,9759	48,7%	5018	41,0%
TR=5	Cenário base	2,577	-	11180	-
	Cenário 1	2,247	12,8%	7683	31,3%
	Cenário 2	1,354	47,5%	7120	36,3%
TR=10	Cenário base	3,342	-	13640	-
	Cenário 1	3,103	7,2%	9707	28,8%
	Cenário 2	1,886	43,6%	9010	33,9%

Em todos os cenários, houve uma grande redução do volume escoado e da vazão de pico com a utilização de LIDs. Os pavimentos permeáveis mostraram um desempenho melhor, o que se deve à forma como as LIDs foram distribuídas no espaço. Como foi mostrado na

Tabela 5.7, as trincheiras de infiltração ocupam apenas 0,75% da área das sub-bacias, enquanto que os pavimentos permeáveis ocupam quase 14%. A área de drenagem direcionada para as LIDs é a mesma, porém seria necessário fazer uma maior distribuição de trincheiras para que essas tivessem uma performance melhor. Por se tratarem de intervenções lineares que não podem ser distribuídas espacialmente de forma aleatória, há essa dificuldade de alocação das trincheiras de infiltração.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Apesar de não ser possível fazer a calibração do modelo, a utilização de modelagem hidrológica-hidráulica pelo modelo SWMM se comprovou como uma boa ferramenta para avaliação dos sistemas de drenagem em pequenas bacias urbanas, podendo-se ajustar o modelo por meio da comparação com os resultados do cálculo da vazão de pico pelo Método Racional.

Observou-se que a utilização das medidas de baixo impacto (LIDs) nas sub-bacias analisadas da região do Lago Norte contribuiu fortemente para a redução do volume total escoado para os corpos d'água naturais, porém não foram suficientes para manutenção da vazão específica desejada em nenhum dos cenários para a chuva com tempo de retorno igual a 10 anos, conforme requerido pela Adasa. Conclui-se que existe uma grande dificuldade em fazer a recuperação dessa vazão de pré urbanização uma vez que a área já sofreu grandes modificações.

No entanto, conclui-se que as LIDs mostram ótimo funcionamento na atenuação dos efeitos das chuvas com tempo de retorno pequeno, de até 2 anos. Seu uso permitiu a redução da vazão de pico, grande redução de volume de água escoado e principalmente redução do volume de extravasamentos ao longo da rede.

Para o amortecimento da vazão de pico da situação analisada, uma alternativa seria a implementação de medidas ainda mais estruturais, como a inserção de bacias de retenção. Esse tipo de medida tem um caráter mais forte de interferência na paisagem natural, necessitando-se reservar grandes áreas para sua construção, que poderiam ser pensadas de forma a integrar o projeto urbanístico.

Outras medidas estruturais também poderiam ser combinadas com o uso de LIDs para favorecer os resultados, tais como a utilização de medidas dentro dos lotes, reduzindo a vazão descarregada na rede pública de drenagem, assim como é previsto na Resolução Adasa nº 09/2011. Esse tipo de medida enfrenta uma barreira muito grande relacionada à responsabilização dos proprietários dos lotes, que deveriam arcar com as dificuldades operacionais e financeiras decorrentes da implementação de dispositivos de retenção e infiltração.

A rede de drenagem implementada na região do Lago Norte possui uma facilidade grande de lançamento do volume drenado em corpos d'água devido à proximidade com o Lago Paranoá e o Ribeirão do Torto, de modo que as redes não possuem grande extensão. Além

disso, a região possui um índice relativamente alto de ocupação por áreas verdes. Tudo isso contribui para redução dos problemas de extravasamento na rede, seja facilitando o escoamento para jusante ou promovendo a infiltração.

Ainda assim, principalmente na sub-bacia Residencial, há muitos pontos de extravasamento, sendo um problema para a salubridade ambiental dessas regiões, fazendo-se necessária e positiva a introdução de medidas de baixo impacto na região. Além de contribuir para redução dos extravasamentos, as LIDs retardam o escoamento das águas até o Lago Paranoá. Elas também promovem o aumento da infiltração, fenômeno importante na medida em que contribui para a manutenção de vazões no Lago durante todo o ano, principalmente neste momento em que o mesmo começa a ser utilizado como fonte de abastecimento para a região.

Observou-se uma eficiência maior da rede implementada na região do CA. Embora a área da sub-bacia Residencial tenha a maior ocupação por áreas vegetadas, foi a que apresentou mais problemas de inundação. Uma hipótese para tal resultado é o fato de que a área do CA foi ocupada mais recentemente e possui característica de ocupações verticais.

A Resolução nº 9/2011 da Adasa determina a vazão máxima de lançamento de águas pluviais em corpos hídricos do DF limitada a 24,4L/s/ha. No entanto, no presente trabalho é possível observar o quão distante é essa realidade para regiões já plenamente urbanizadas e com rede de drenagem implementada. A vazão específica gerada nas sub-bacias da região analisada é muito maior do que a vazão de pré-desenvolvimento determinada pela Adasa. Seriam necessários grandes investimentos e utilização de medidas estruturais e não estruturais, tais como a fiscalização sobre o uso e ocupação do solo conforme determinado nos planos diretores.

Observou-se uma dificuldade com relação à alocação de LIDs nas sub-bacias analisadas, principalmente com relação às trincheiras de infiltração. Os pavimentos permeáveis devem ser alocados no espaço de forma que não transitem automóveis pesados ou em alta velocidade. As trincheiras de infiltração por sua vez são dispositivos lineares que não podem ser alocados em locais com grande fluxo de carros, ocupando uma área bem pequena da bacia. Devido a essa dificuldade, não foi possível ocupar de forma eficiente uma grande área da sub-bacia e o cenário mais realista de utilização de trincheiras de infiltração teve um impacto singelo na redução de vazão de pico e de volume de escoamento nas sub-bacias.

A utilização de formas combinadas de LIDs, usando valas de infiltração combinados com trincheiras de infiltração ou com pavimentos permeáveis, conseguiu reduzir consideravelmente a o volume de água escoado e a ocorrência de extravasamento, fazendo um uso racional da distribuição de uso de solo da região e aproveitando os espaços de área vegetada e de campos abertos ou mato.

A drenagem e manejo de águas pluviais constitui em um problema complexo a ser manejado de maneira integral para que a população e o meio ambiente não sofram com seus impactos negativos. Verifica-se que após a urbanização de uma área e implementação de um sistema, é difícil recuperar as taxas de infiltração e retenção da água na bacia para que seja feita a manutenção da vazão da saída da mesma em níveis próximos da condição natural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, **NBR 16416 Pavimentos Permeáveis de Concreto - Requisitos e Procedimentos**. 2015.

Adasa – Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal. **Manual de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas do Distrito Federal**. Edição revista e atualizada. Brasília, DF: Adasa, 2018.

Adasa – Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal. Resolução nº 9, de 8 de abril de 2011. Estabelece os procedimentos gerais para requerimento e obtenção de outorga de lançamento de águas pluviais. **Diário Oficial do Distrito Federal**, Brasília, 8 abr. 2011.

Araújo, P.R., Tucci, C.E.M., Goldenfum, J.A. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. **RBRH**, Porto Alegre, v. 5, n. 3, p 21-29, 2000.

Baptista, M., Nascimento, N., Barraud, S. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. 2 ed. Porto Alegre: ABRH, 2005.

Brasil. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico. **Diário Oficial da União**, Brasília, 5 jan. 2007.

Brasil. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. **Diário Oficial da União**, Brasília, 8 jan. 1997.

Campana, N.A., Bernardes, R.S., Silva Jr., J.A. Controle qualitativo e quantitativo do escoamento pluvial urbano com bacias de retenção. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 2, n. 3, p. 98-111, 2007.

Chi Water. **PCSWMM Support**. Disponível em: <<https://support.chiwater.com/>>. Acesso em: 20 out. 2018.

Canholi, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

CHI - Computational Hydraulics International. **My Workbook – PCSWMM**. CHI, 2017.

Codeplan - Companhia De Planejamento Do Distrito Federal. **Distrito Federal em síntese: Informações socioeconômicas e geográficas – 2012**. Brasília, DF: Codeplan, 2013.

Codeplan - Companhia De Planejamento Do Distrito Federal. **Pesquisa distrital por amostra de domicílios: Lago Norte – PDAD 2016**. Brasília, DF: Codeplan, 2016.

Costa, A. R., Siqueira, E. Q. de, Menezes Filho, F. C. M. de. **Curso Básico de Hidrologia Urbana: nível 3**. Brasília: ReCESA, 2007.

Costa, M.E.L. **Monitoramento e modelagem das águas da drenagem urbana na bacia do lago Paranoá**. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF: UnB, 2013.

Dietz, M.E. Low Impact Development Practices: A Review of Current Research and Recommendations for Future Directions. **Water, Air & Soil Pollution**, v. 186, p. 351-363, nov., 2007.

Fernandes, C.Y., Costa, M.E.L., Koide, S. Análise de problemas de novos loteamentos: estudo de caso da Cidade Estrutural, DF. In: XI Encontro Nacional de Águas Urbanas, 2017, Belo Horizonte.

Fileni, F. **Modelagem quantitativa da drenagem urbana e proposições de drenagem sustentável para a região de Ceilândia-DF**. Monografia de projeto final em engenharia ambiental. Brasília, DF: UnB, 2017.

Garcia, J.I.B. **Monitoramento hidrológico e modelagem da drenagem urbana da bacia hidrográfica do Arroio Cancela**. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal de Santa Maria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Santa Maria, RS: UFSM, 2005.

GDF – Governo do Distrito Federal. **Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal**. Brasília: Secretaria de Estado de Obras do DF, 2009.

Lima, J. E. F. W., *et al.* Desenvolvimento de base de dados de solos para a aplicação do modelo SWAT em bacia do bioma Cerrado. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013, Bento Gonçalves/RS

Moreira, D., Baptista, M. Incorporação de técnicas compensatórias em projeto de microdrenagem. In: XI Encontro Nacional de Águas Urbanas, 2017, Belo Horizonte.

Rangari, V.A., Patel, A.K., Umamahesh, N. V. Review of urban stormwater models. In: 20th International Conference on Hydraulics, Water Resources and River Engineering, 2015, Roorkee, India.

Reatto, A., *et al.* **Mapa Pedológico Digital – SIG Atualizado do Distrito Federal Escala 1:100.000 e uma Síntese do Texto Explicativo**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004.

Righetto, A.M. **Manejo de Águas Pluviais**. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

Rossman, L.A. **Storm Water Management Model User's Manual**. Ohio, USA: United States Environmental Protection Agency, set., 2015.

Rossman, L.A. **EPA SWMM 5.0 Modelo de Gestão de Drenagem Urbana: manual do usuário**. Tradução Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento. Versão brasileira. João Pessoa, Paraíba: UFPB, 2012.

Santos, F. M., Lollo, J. A. Cartografia digital para estimativa de escoamento superficial visando ao planejamento urbano. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.21, n.4, 663-675, out./dez., 2016.

Tucci, C.E.M. **Drenagem urbana**. Porto Alegre: Editora da Universidade UFRGS/ABRH, 1995.

Tucci, C.E.M (Org). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2001.

Tucci, C.E.M. **Inundações Urbanas**. 1. ed. Porto Alegre: ABRH, 2007.

Tucci, C.E.M. Regulamentação da drenagem urbana no Brasil. **REGA**, v. 13, n. 1, p. 29-42, ABRH, 2016.

USDA - United States Department Of Agriculture. **Urban Hydrology for Small Watersheds**: Technical Release 55. 2. ed. USDA, 1986.

Woods Ballard, B., *et al.* **The SuDS Manual**. v. 5. Londres: CIRIA, 2015.

Zanandrea, F., Silveira, A. L. L. da. Effects of LID Implementation on Hydrological Processes in an Urban Catchment under Consolidation in Brazil. **Journal of Environmental Engineering**, v. 144, n. 9, 2018.